

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO
ADICIONADO CON EAFS Y POLVO DE VIDRIO RECICLADO

JULIAN ADOLFO DIAZ PITA
MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS
TUNJA
2018

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO
ADICIONADO CON EAFS Y POLVO DE VIDRIO RECICLADO

JULIAN ADOLFO DIAZ PITA
MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ RODRÍGUEZ

Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO EN TRANSPORTE Y VÍAS

Director
Ing. Msc. YASMIN ANDREA PÉREZ ROJAS

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS
TUNJA
2018

Nota de aceptación:

Firma del presidente de jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja 19 de febrero de 2018.

La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería reside en ella misma, por lo tanto, no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de investigación. Se autoriza su uso y reproducción indicando su origen

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la ingeniera Yasmin Pérez, por la oportunidad de trabajar con ella, pues gracias a su esfuerzo, hoy podemos aportar algo a la investigación de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Al ingeniero Manuel Arciniegas, quien, con su gran entusiasmo y apoyo, nos abrió las puertas del laboratorio de suelos y pavimentos para que trabajáramos con las mejores condiciones posibles. Gran persona y amigo.

Al ingeniero Richard Benítez por su colaboración en la resolución de dudas en la elaboración de ensayos de caracterización de materiales.

A los ingenieros y trabajadores de LÓPEZ HERMANOS LTDA., quienes aportaron experiencia y conocimientos mientras se trabajó en esta empresa.

A la vida que nos ha dado tanto.

JULIAN ADOLFO DIAZ PITA
MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ RODRÍGUEZ

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	19
RESUMEN.....	20
1. ESTADO DEL ARTE.....	21
1.1 ESTADO DEL ARTE DE LA EAFS EN EL CONCRETO.....	21
1.2 ESTADO DEL ARTE DEL POLVO DE VIDRIO RECICLADO EN EL CONCRETO....	26
1.3 ESTADO DEL ARTE DE EAFS Y PVR EN CONCRETO.....	29
2. MARCO CONCEPTUAL.....	32
2.1 VIDRIO.....	32
2.2 ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.....	33
2.3 AGREGADOS.....	34
2.3.1 Agregado grueso o grava.....	34
2.3.2 Agregado fino o arena.	34
2.4 CEMENTO.....	34
3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES PARA MEZCLA DE CONCRETO.....	36
3.1 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS GRUESOS.	36
3.1.1 Análisis granulométrico del agregado grueso, INV E 213-13.	37
3.1.2 Desgaste en la máquina de los Ángeles, INV E 218-13.	39
3.1.3 Degradación por abrasión en el equipo Micro – Deval, INV E 238-13.	39
3.1.4 Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, INV E 224-13..	39
3.1.5 Pérdida en el ensayo de solidez en sulfato de magnesio, INV. E 220-13.....	40

3.1.6 Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos INV E 240 -13.....	40
3.1.7 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV E 227 – 13.	41
3.1.8 Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados INV E - 211- 13.	41
3.1.9 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso, INV E – 223 -13..	42
3.2 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS FINOS:	44
3.2.1 Análisis granulométrico del agregado fino, INV E 213-13.....	44
3.2.2 Pérdida en el ensayo de solidez en sulfatos, INV E 220-13..	46
3.2.3 Índice de plasticidad, INV E 125 y 126 -13.....	46
En la imagen 8 se puede ver el procedimiento de laboratorio para este ensayo.	46
3.2.4 Equivalente de arena, INV E 133-13.....	47
3.2.5 Terrones de arcilla y partículas deleznales, INV. E 211-13..	48
3.2.6 Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz 75 µm No. 200 mediante lavado, INV. E 214-13.....	48
3.2.7 Absorción de agua, INV E 222-13.	49
3.3 CEMENTO.....	51
4. OBTENCIÓN DE MATERIALES NO CONVENCIONALES	52
4.1 PROCESO PARA OBTENER LA ARENA DE VIDRIO.....	52
4.1.1 Recolección del vidrio.	52
4.1.2 Limpieza de etiquetas y plástico de las botellas.....	52
4.1.3 Esterilización de las botellas. Segunda limpieza (profunda).....	53
4.1.4 Rotura de botellas con martillo.....	53

	pág.
4.1.5 Molienda del vidrio en la máquina de los ángeles.	54
4.1.6 Tamizado del vidrio.	54
4.1.7 Vidrio al tamaño de la arena.	54
4.2 PROCESO PARA OBTENER LA ESCORIA AL TAMAÑO DE LA GRAVA	56
4.2.1 Tamizado de la escoria.	56
4.2.2 Escoria al tamaño de la grava.	56
5. DISEÑO DE MEZCLA.....	58
5.1 MEZCLA DE CONCRETO	58
5.2 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO.....	59
5.3 EJEMPLO DE DISEÑO DE MEZCLA	60
5.3.1 Agregado grueso:	60
5.3.2 Agregado fino:	60
5.3.3 Cemento:	60
5.3.4 Elección del asentamiento.	60
5.3.5 Elección tamaño máximo del agregado.	61
5.3.6 Estimación del contenido de aire. La metodología ACI 211.1	62
5.3.7 Estimación del contenido de agua de mezclado.	63
5.3.8 Selección de la relación agua – cemento.	64
5.3.9 Cálculo del contenido de cemento.	65
5.3.10 Estimación de las proporciones de agregado.....	65
5.3.11 Ajuste por humedad del agregado.	67
5.3.12 Ajustes en las mezclas de prueba.....	68
5.4 PROCESO DE FUNDICIÓN DE CILINDROS	71

	pág.
5.4.1 Especímenes.....	71
5.4.2 Equipo necesario.....	71
5.4.3 Mezclado.....	71
5.4.4 Medida del asentamiento.....	71
5.4.5 Colocación de la mezcla en el molde.....	72
5.4.6 Medida de la densidad.....	72
5.4.7 Desencofrado y curado de los cilindros.....	73
5.4.8 Falla por compresión de los cilindros.....	73
5.4.9 Fundición y falla de vigas.....	74
5.5 AJUSTE POR ASENTAMIENTO.....	75
5.6 AJUSTE POR RESISTENCIA.....	75
5.7 FUNDICIÓN DE MEZCLA DEFINITIVA.....	76
5.8 FUNDICIÓN DE VIGAS CON RELACIÓN A/C 0.45 CONSTANTE.....	78
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	80
6.1 PATRÓN DE FISURA MEZCLAS DE CONCRETO FALLADAS.....	80
6.2 RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MEZCLAS DE PRUEBA. GRÁFICAS RESISTENCIA VS EDAD.....	82
6.2.1 Mezcla M1.....	83
6.2.2 Mezcla M2.....	84
6.2.3 Mezcla M3.....	85
6.2.4 Mezcla M4.....	86
6.3 RESISTENCIA CARACTERÍSTICA.....	87
6.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS RESISTENCIAS DE LAS MEZCLAS DE PRUEBA.....	88

	pág.
6.5 DENSIDADES EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO DE LOS CILINDROS	89
6.6 MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LABORATORIO Y TEÓRICO	89
6.7 RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN	91
6.7.1 Mezcla M1.	92
6.7.2 . Mezcla M2.	93
6.7.3 Mezcla M3.	94
6.7.4 Mezcla M4.	95
6.8 MR LABORATORIO vs MR TEÓRICO	97
6.9 RELACIÓN ENTRE F'ck Y MR TEÓRICO	98
6.10 CUMPLIMIENTO DE LAS MEZCLAS PARA CADA NIVEL DE TRÁNSITO	99
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES.....	104
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	105
ANEXOS	109

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Porcentaje de reemplazo de escoria por material convencional.	22
Tabla 2. Resumen de la recopilación hecha en el estudio para Hong Kong. Porcentaje de reemplazo de agregado fino y grueso por vidrio y las resistencias pertinentes.	28
Tabla 3. Mezclas en dos lotes según la relación agua/cemento.....	30
Tabla 4. Mezclas en dos lotes según la relación agua/cemento.....	31
Tabla 5. Composición química del vidrio según 3 artículos científicos.	32
Tabla 6. Composición química de la EAFS.	33
Tabla 7. Tipos de cemento.	34
Tabla 8. Gradación de la grava y la escoria.	37
Tabla 9. Combinación de agregados para la determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados.	41
Tabla 10. Resultado del ensayo de densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.....	42
Tabla 11. Control del agregado grueso según la tabla 500-2 de las Especificaciones Generales de construcción de carreteras, INVIAS 2013	43
Tabla 12. Gradación de la arena y del vidrio.....	44
Tabla 13. Resultados del ensayo de equivalente de arena.	47
Tabla 14. Absorción de agregado fino convencional (arena) y no convencional en proporciones de mezcla (arena a determinado porcentaje de vidrio).	49
Tabla 15. Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización del agregado fino.....	50
Tabla 16. Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización del agregado fino.....	51
Tabla 17. Proporción de cada tamiz para llevar el vidrio al tamaño de la arena en 5kg. ..	55
Tabla 18. Ejemplo de cantidad de vidrio según mezcla, para 3 kg.	55
Tabla 19. Proporción de cada tamiz para 5kg de escoria al tamaño de la grava.....	57

Tabla 20. Mezclas de concreto.	58
Tabla 21. Resistencia de diseño a compresión cuando no hay datos que permitan calcular la desviación estándar de la muestra.	59
Tabla 22. Selección de asentamiento para diseño de mezcla.	61
Tabla 23. Contenido aproximado de aire esperado en concreto sin aire incluido y con diferentes niveles de aire incluido.	63
Tabla 24. Contenido aproximado de agua para mezclado esperado.	64
Tabla 25. Resistencia de diseño a compresión cuando no hay datos que permitan calcular la desviación estándar de la muestra.	64
Tabla 26. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.	65
Tabla 27. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.	66
Tabla 28. Peso seco y volumen de agregado grueso por metro cúbico de concreto.	68
Tabla 29. Parámetros de diseño para las 4 mezclas. Volumen por m ³ de concreto.	69
Tabla 30. Proporciones de trabajo para mezclas convencionales y no convencionales por m ³ de concreto para análisis a compresión simple.	70
Tabla 31. Proporciones de trabajo para mezclas convencionales y no convencionales por m ³ de concreto para análisis por flexotracción.	70
Tabla 32. Total, de cilindros por mezcla para la primera verificación por resistencia.	75
Tabla 33. Relaciones agua - cemento en la combinación 25% EAFS y 75% Grava.	77
Tabla 34. Total, general de cilindros fundidos durante el trabajo de investigación.	77
Tabla 35. Cilindros y vigas para cada mezcla fundidos.	78
Tabla 36. Esquema del patrón de fractura de los cilindros sometidos a compresión.	80
Tabla 37. Patrón de fractura para los cilindros a compresión según la mezcla, edad y muestra.	81
Tabla 38. Resistencia del concreto según la edad y cemento tipo I (UG) colombiano. Para rangos de R a/c entre 0.7 y 0.4.	82
Tabla 39. Resultados resistencia a la compresión mezcla M1. R a/c 0.45	83

Tabla 40. Resultados resistencia a la compresión mezcla M2. R a/c 0.45.	84
Tabla 41. Resultados resistencia a la compresión mezcla M3. R a/c 0.44	85
Tabla 42. Resultados resistencia a la compresión mezcla M4. R a/c 0.46	86
Tabla 43. Resistencia característica para la resistencia a la compresión.	88
Tabla 44. Densidades en estado fresco y endurecido del concreto para las mezclas.	89
Tabla 45. Módulo de elasticidad teórico para la mezcla M1. R a/c 0.45	90
Tabla 46. Módulo de elasticidad teórico para la mezcla M2. R a/c 0.45.	91
Tabla 47. Módulo de elasticidad teórico para la mezcla M3. R a/c 0.44.	91
Tabla 48. Módulo de elasticidad teórico para la mezcla M4. R a/c 0.46.	91
Tabla 49. Resultados de resistencia a flexotracción mezcla M1. R a/c 0.45	92
Tabla 50. Resultados de resistencia a flexotracción mezcla M2. R a/c 0.45	93
Tabla 51. Resultados de resistencia a flexotracción mezcla M3. R a/c 0.45.	94
Tabla 52. Resultados de resistencia a flexotracción mezcla M4. R a/c 0.45.	95
Tabla 53. Resultados MR teórico autores varios, para la mezcla M1. R a/c 0.45.	97
Tabla 54. Resultados MR teórico autores varios, para la mezcla M2. R a/c 0.45.	97
Tabla 55. Resultados MR teórico autores varios, para la mezcla M3. R a/c 0.45.	98
Tabla 56. Resultados MR teórico autores varios, para la mezcla M4. R a/c 0.45.	98
Tabla 57. Relación entre resistencia característica a la compresión y módulo de rotura teórico y relación a/c variable por mezcla, a los 28 días.	98
Tabla 58. Requisitos de diseño para pavimento en concreto hidráulico por INVIAS.	100

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Franjas granulométricas agregados gruesos.	38
Gráfica 2. Ajuste de la grava y la escoria para cumplimiento de la norma vigente.	38
Gráfica 3. Gradación de la arena y del vidrio.	45
Gráfica 4. Ajuste de la granulometría del vidrio al de la arena.	45
Gráfica 5. Resistencia a compresión vs tiempo. Mezcla M1.	83
Gráfica 6. Resistencia a compresión vs tiempo mezcla M2.	84
Gráfica 7. Resistencia a compresión vs tiempo. Mezcla M3.	85
Gráfica 8. Resistencia a compresión vs tiempo. Mezcla M4.	86
Gráfica 9. Resistencia a flexotracción vs tiempo. Mezcla M1.	93
Gráfica 10. Resistencia a la flexotracción vs tiempo. Mezcla M2.	94
Gráfica 11. Resistencia a la flexotracción vs tiempo. Mezcla M3.	95
Gráfica 12. Resistencia a la flexotracción vs tiempo. Mezcla M4.	96

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Escoria, vidrio y agregado ligero a diferentes tamaños usado en el estudio....	30
Imagen 2. Escoria de horno de arco eléctrico (EAFS).	33
Imagen 3. Procedimiento para determinar el 10% de finos en el agregado grueso.....	39
Imagen 4. Escoria y grava en solución e sulfato de magnesio.	40
Imagen 5. Procedimiento de ensayo para determinar las partículas planas y alargadas..	40
Imagen 6. Preparación y realización ensayo de densidad, densidad relativa (gravedad específica y absorción del agregado grueso).....	42
Imagen 7. Agregado fino en inmersión en sulfato de magnesio.	46
Imagen 8. Índice de plasticidad y límites de Atterberg.	46
Imagen 9. Ensayo de equivalente de arena.	47
Imagen 10. Lavado del material en tamiz especificado para determinar terrones de arcilla y partículas deleznable.	48
Imagen 11. Lavado del material en tamiz No. 200.	48
Imagen 12. Proceso de obtención de gravedad específica y absorción del agregado fino convencional y no convencional.	49
Imagen 13. Recolección del vidrio transparente de las chatarrerías.	52
Imagen 14. Quitado de etiquetas y plástico de las botellas. Limpieza inicial.	53
Imagen 15. Esterilización de las botellas. Limpieza profunda.	53
Imagen 16. Rotura de las botellas con martillo de compactación de briquetas de asfalto.	53
Imagen 17. Molienda del vidrio en la Máquina de los Ángeles.	54
Imagen 18. Tamizado del vidrio luego de molienda en máquina de los ángeles.	54
Imagen 19. Vidrio molido, tamizado y separado para llevarlo al tamaño exacto de la arena.	55
Imagen 20. Cambio de color de la arena al agregar vidrio en sustitución parcial de su volumen (20%, 30% y 40%).....	56

Imagen 21. Tamizado de la escoria en cantera.	56
Imagen 22. Equipo de fundición de cilindros del laboratorio de suelos y pavimentos UPTC.	71
Imagen 23. Medida del asentamiento de la mezcla.	72
Imagen 24. Mezcla en el molde cilíndrico.	72
Imagen 25. Peso de cilindro solo y con mezcla (izquierda y derecha respectivamente) ..	73
Imagen 26. Cilindros en inmersión. Foto bajo el agua.....	73
Imagen 27. Falla por compresión de los cilindros en el laboratorio.	74
Imagen 28 . A la izquierda realización de las vigas y a la derecha vigas recién fundidas.	74
Imagen 29. Falla en los tercios medios de las vigas. Medida de rotura a la flexotracción.	75
Imagen 30. Cilindros de la primera fundición por resistencia para todas las mezclas.	76
Imagen 31. Inmersión de los cilindros de la primera fundición por resistencia.	76
Imagen 32. Cilindros de la fundición definitiva en inmersión para todas las mezclas.	78
Imagen 33. Cilindros de verificación de resistencia.....	78
Imagen 34. Vigas para medida de resistencia a la flexotracción	79
Imagen 35. Montaje del ensayo de resistencia a flexotracción.....	96
Imagen 36. Falla de una viga en laboratorio en su tercio medio.	96

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Resistencia a la compresión a los 28 días para las resistencias esperadas según el porcentaje de reemplazo en volumen.	23
Figura 2. Resistencia a la compresión de las mezclas del estudio a los 28 días.	24
Figura 3. Resistencia a la compresión de los cilindros variando el porcentaje de escoria a los 7 y 28 días.	25
Figura 4. Resultados de la resistencia a la compresión de la mezcla definitiva con escoria y grava sin arena R a/c 0.36.	26
Figura 5. Resistencia a la compresión de las distintas mezclas diseñadas con vidrio en reemplazo del agregado fino a los 7, 14, 28, 60, 180 y 365 días.	27
Figura 6. Resistencia a la compresión de los cilindros con R a/c 04 para las diferentes mezclas de sustitución matriz gruesa por vidrio.	27
Figura 7. Pasos para convertir el vidrio en materia con valor agregado y sus aplicaciones.	28
Figura 8. Ubicación cantera Santa Lucia, Cucaita – Boyacá.	36
Figura 9. Localización de la planta Gerdau Diaco, Tuta, Boyacá.	37
Figura 10. Distribución normal de resistencias.	87
Figura 11. Dimensiones de las vigas para el ensayo de resistencia a flexotracción.	92

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Contenido de cemento	65
Ecuación 2. Peso seco del agregado	66
Ecuación 3. Volumen absoluto.....	66
Ecuación 4. Peso húmedo del agregado grueso.....	67
Ecuación 5. Peso húmedo del agregado fino.....	67
Ecuación 6. Absorción en los agregados	67
Ecuación 7. Resistencia característica.....	87
Ecuación 8. Coeficiente de variación.	88
Ecuación 9. ACI:	89
Ecuación 10. NSR - 10:	90
Ecuación 11. Gerardo Rivera, Tecnología del Concreto y del Mortero – Unicauca. Valor medio para toda la información experimental nacional:.....	90
Ecuación 12. American Concrete Institute:	97
Ecuación 13. Adam M. Neville:	97
Ecuación 14. PCA:.....	97
Ecuación 15. KHAYAT:.....	97

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado implementa escoria de horno de arco eléctrico (EAFS) y polvo de vidrio reciclado (PVR), materiales no convencionales, en concreto hidráulico para la fabricación de pavimentos rígidos. El control de los materiales, con requerimientos de calidad, se hace con las Especificaciones y Normas generales de Construcción de Carreteras, del Instituto Nacional de Vías, INVIAS, para el 2013.

La EAFS, es desde hace décadas, investigada e implementada en proyectos ingenieriles con concreto en países industrializados de Europa, como Alemania. El vidrio, por su parte, es un material que puede tener muchos usos en la ingeniería por su alta resistencia al fuego y poca absorción. Ambos son desechos que a nivel regional se producen: el primero por la industria del acero y el segundo por la industria licorera y de gaseosas, pues los desechos de vidrio tienen un porcentaje considerable en los rellenos en todo el territorio nacional.

El trabajo de grado denominado “Análisis del comportamiento del concreto hidráulico adicionado con EAFS y polvo de vidrio reciclado, hace parte de la línea de investigación de la tesis doctoral “DESEMPEÑO DEL REEMPLAZO EN AGREGADOS DE CONCRETO POR EAFS Y VMR, Y ANÁLISIS DE CORROSIÓN”.

El primer capítulo consta del estado del arte, fundamental para entender el contexto actual de la investigación, qué se ha desarrollado, y en qué punto está el estudio del tema. El segundo capítulo resume los conceptos del presente trabajo. Se definen los componentes de la mezcla: escoria, vidrio, agregados, agua y cemento. El tercer capítulo, es la caracterización de los materiales para su inclusión en la mezcla de concreto, siguiendo las indicaciones de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras del INVIAS. El cuarto capítulo es el diseño de la mezcla de concreto bajo la metodología ACI 211.1, la cual tiene como finalidad estimar las proporciones del material de acuerdo a sus propiedades, para cumplir con la resistencia de diseño. El quinto capítulo abarca el diseño metodológico del trabajo de investigación, es decir las actividades y procesos necesarios para obtener los materiales al tamaño requerido. El sexto capítulo indica los resultados obtenidos luego de la falla de los cilindros y vigas a las edades especificadas, el análisis estadístico de los resultados. Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

RESUMEN

El presente trabajo muestra el análisis del comportamiento del concreto hidráulico adicionado con materiales no convencionales, concretamente, EAFS y PVR, en sustitución parcial de los agregados convencionales en volumen (grava y arena respectivamente). La proporción de sustitución de la grava (AG) por EAFS, es del 25% y 75% de grava para cada una de las mezclas. Se hará la sustitución del agregado fino (AF) por vidrio molido reciclado en 20%, 30% y 40%.

Se diseñaron 4 mezclas de concreto, la primera *mezcla patrón* con materiales convencionales (100% AG y 100% AF), las tres mezclas restantes con materiales no convencionales que estarán sustituidos parcialmente por EAFS y PVR así, AG / EAFS 75 – 25, AF/ PVR 80 – 20, AG/ EAFS 75 – 25, AF/ PVR 70 – 30 y AG/ EAFS 75 – 25, AF/ PVR 60 – 40.

Se verificó el cumplimiento de las propiedades mecánicas y físicas de los agregados convencionales (AG y AF), de acuerdo a las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras del INVIAS capítulo 5, numeral 500.2, tablas 500-2 y 500-4. Una vez caracterizado el material se procedió a diseñar la mezcla de concreto. Este diseño se hizo por el método ACI 211.1, donde se determinaron las proporciones adecuadas de cada agregado (en peso) para cumplir con una resistencia requerida mínima de 28 Mpa.

Verificada la calidad del material y realizado el diseño de la mezcla, se funden las muestras a ensayar, para determinar la resistencia a la compresión a las edades de 7 y 28 días, resistencia a la flexotracción a 7, 14 y 28 días y el módulo de elasticidad a la mezcla de mejor desempeño en compresión y flexotracción.

Palabras clave: escoria de horno de arco eléctrico (EAFS), polvo de vidrio reciclado (PVR), concreto no convencional, resistencia a la compresión, resistencia a la flexotracción, módulo de elasticidad.

1. ESTADO DEL ARTE

Una revisión general de artículos científicos, permitió contextualizar el tema de estudio, en cuanto a lo que se ha investigado y desarrollado hasta el momento. Se encontraron investigaciones sobre la EAFS en concreto, vidrio reciclado en concreto y su uso simultaneo en concretos. Se observaron similitudes y diferencias en las metodologías, además de resultados que permiten tener una idea general del posible comportamiento de las mezclas al adicionar materiales no convencionales como sustitutos parciales en volumen de los agregados convencionales. Los artículos consultados se mencionan a continuación:

1.1 ESTADO DEL ARTE DE LA EAFS EN EL CONCRETO

Subathra y Gnanavelb^[1] investigaron el efecto en las propiedades del concreto (compresión, tensión, flexión, durabilidad y resistencia al ácido), cuando se hace un reemplazo parcial de los agregados fino o grueso por EAFS, con el fin de determinar la viabilidad del uso de la escoria en concreto hidráulico.

La resistencia a la compresión de los cilindros, fue verificada a los 7 y 28 días de un promedio de 3 especímenes para cada caso. Se diseñaron un total de 11 mezclas en las cuales se alternó la implementación de la escoria gruesa en reemplazo de la grava y la escoria fina en sustitución parcial de la arena.

El diseño se hizo con una relación agua-cemento (R a/c) constante para todas las mezclas de 0.55, implementando cemento Portland tipo 53, y con un diseño de mezcla M20 siguiendo la normatividad india. (IS 10262 – 1982). La tabla 1 muestra los resultados de resistencia a la compresión de los cilindros a los 28 días para las 11 mezclas con R a/c 0.55.

Los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión de los cilindros a los 28 días, definieron que el porcentaje óptimo de reemplazo en la matriz fina, es decir reemplazando escoria por arena fue del 40%, con 21.67 Mpa y de la matriz gruesa, escoria por grava fue del 30% con 28.33 Mpa. Aunque concluyó que es viable la ejecución de la escoria en el concreto, no se contemplaron mezclas con combinaciones de escoria gruesa y fina en reemplazo por el agregado convencional simultáneamente para observar el comportamiento a la resistencia de la mezcla.

^[1] SUBATHRA, Devia y GNANAVELB, B.K. Properties of concrete manufactured using Steel slag [Propiedades del concreto adicionado con escoria]. [base de datos en línea]. 1^{ra} ed. Tamilnadu (India). Publicado por Elsevier Ltda. 2014. Disponible en internet <www.sciencedirect.com>

Tabla 1. Porcentaje de reemplazo de escoria por material convencional.

Mezcla	% Escoria fina por arena	% Escoria gruesa por grava	Resistencia a la compresión a 28 días Mpa
1	0	0	20.67
2	10	0	19.56
3	20	0	20.1
4	30	0	20.78
5	40	0	21.67
6	50	0	19.32
7	0	10	22.8
8	0	20	24.75
9	0	30	28.33
10	0	40	27.02
11	0	50	25.06

Fuente. Basados en SUBATHRA, Devia y GNANAVELB, B.K. Proprieties of concrete manufactured using Steel slag [Propiedades del concreto adicionado con escoria]., p 4.

El estudio realizado en la universidad King Saud de la india ^[2] abarca la realización de tres mezclas de concreto: una para que cumpla una resistencia esperada de 20 Mpa, la segunda para 30 Mpa y la tercera para 40 Mpa. Cada una de las mezclas contiene un porcentaje de reemplazo del agregado grueso por EAFS en las siguientes proporciones: 0%, 25%, 50%, 75% y 100%.

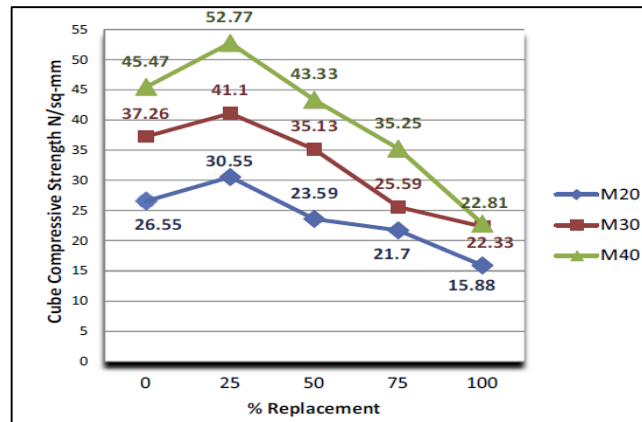
Los resultados arrojaron que para la resistencia de diseño esperada de 20 Mpa, de los 5 porcentajes, solo la mezcla que reemplazó totalmente el agregado grueso no cumplió con la resistencia esperada a los 28 días con un valor de 15.88%, equivalente al 79.4%. Las mezclas con resistencia de diseño de 30 Mpa y 40 Mpa presentaron un comportamiento similar pues al 75% y 100% no cumplieron dicha resistencia.

El mejor reemplazo del agregado grueso es del 25% por presentar mejor resistencia a la compresión a los 28 días, por encima del agregado convencional y las sustituciones del 50%, 75% y 100% respectivamente.

^[2] SABAPATHY, Y.K, *et al.* Experimental investigation of surface modified EOF steel slag as coarse aggregate in concrete. [Investigación experimental de la EOF de acería como agregado en concreto] [base de datos en línea]. 1^{ra} ed. Tamil Nadu (India). Publicado por: Elsevier B.V. King Saud University. 19 de julio de 2016. Disponible en internet: <www.sciencedirect.com>

Es importante destacar este estudio, porque sustenta que la sustitución del agregado grueso por escoria al 25% es la mejor combinación para obtener una resistencia a la compresión, reafirmando el objeto de la presente investigación, como muestra la figura 1.

Figura 1. Resistencia a la compresión a los 28 días para las resistencias esperadas según el porcentaje de reemplazo en volumen.



Fuente. Tomado de SABAPATHY, Y.K, *et al.* Experimental investigation of surface modified EOF steel slag as coarse aggregate in concrete. [Investigación experimental de la EOF de acería como agregado en concreto]. p 5.

La metodología empleada por Coppola L. *et al*³, reemplaza en proporción de volumen la escoria por la grava: 10%,15%, 20% y 25%, previa verificación de la cantidad optima de los agregados en la mezcla por el método de Bolomey, en donde se determinó que el porcentaje máximo de reemplazo conveniente para la mezcla debía ser hasta del 25% en masa.

Implementaron un superplastificante de clase 4 de acuerdo a la norma italiana (EN 206-1) y se mantuvo una R a/c constante para todas las mezclas de 0.54. Además, se mantuvo una verificación del asentamiento entre 30 y 60 mm según la norma UNI EN 12350-2.

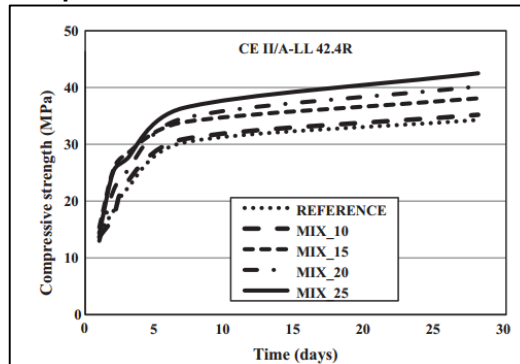
Se verificó la densidad y la resistencia a la compresión a la edad de 1,2,3,7 y 28 días, la resistencia a la flexión, la resistencia a la tracción y el módulo elástico a la edad de 28 días y la contracción seca hasta 90 días para el concreto endurecido.

Se observó que la mezcla con el 25% de escoria presenta mayor resistencia a la compresión a 28 días y las mezclas que contienen EAFS superan la resistencia de la mezcla

[3] COPPOLA L. *et al.* Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. [Escoria de horno de arco eléctrico para concreto sostenible]. [Base de datos en línea]. 1^{ra} ed. Bérgamo (Italia). Elsevier Ltda. 29 de junio de 2016. Disponible en línea <www.sciencedirect.com>

de referencia (hecha con materiales convencionales, es decir, sin EAFS). En la figura 2 se muestra la gráfica de resistencia a la compresión para las mezclas indicadas.

Figura 2. Resistencia a la compresión de las mezclas del estudio a los 28 días.



Fuente. Tomado de COPPOLA L. *et al.* Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. [Escoria de horno de arco eléctrico para concreto sostenible]. p 6.

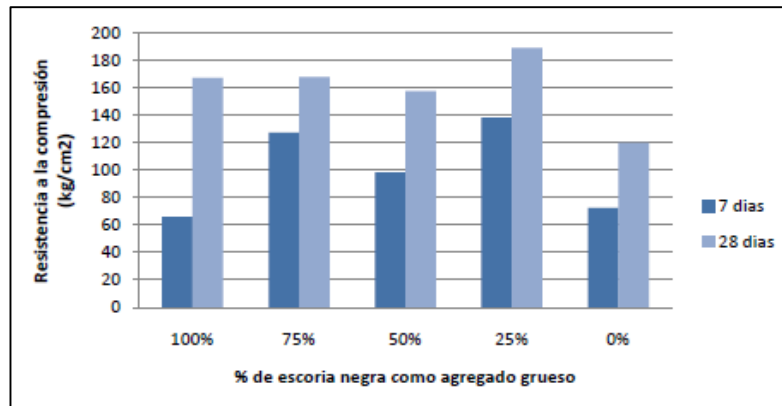
A nivel regional este tema de las escorias no ha sido muy explorado. Por el contrario, son muy pocos los estudios de carácter investigativo que se han hecho para este material. Las estudiantes Lina María Parra y Diana Pilar Sánchez ^[4] en su tesis, estudian principalmente el aprovechamiento de las escorias negras de horno de arco eléctrico generadas por la Siderúrgica DIACO S.A. localizada en el Municipio de Tuta, departamento de Boyacá, haciendo la evaluación técnica, financiera y comercial para evaluar la factibilidad de su uso como agregado en el concreto.

La experimentación consistió en reemplazar el agregado grueso convencional por escoria en dosificaciones de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% y se evaluó la resistencia a los 7 y 28 días. Se concluyó que utilizar escorias negras de acería en el concreto como agregado grueso, mejora considerablemente las propiedades mecánicas, ya que a diferencia del agregado convencional tiene mayor resistencia al desgaste, mayor peso específico y dureza lo que da como resultado elevada resistencia a la compresión.

La tesis desarrollada por las estudiantes de la universidad de la Salle sirvió como punto de partida del presente trabajo de investigación en cuanto a la sustitución parcial del agregado grueso por EAFS de Diaco, pues la mejor composición es la de 25% escoria con 75% agregado convencional, como se muestra en la figura 3.

^[4] PARRA ARAQUE, Lina Maria. y SÁNCHEZ GARCÍA, Diana Pilar. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. Municipio de Tuta Boyacá. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero ambiental. Bogotá. Universidad de la Salle. 2010.118 p.

Figura 3. Resistencia a la compresión de los cilindros variando el porcentaje de escoria a los 7 y 28 días.



Fuente. Tomado de PARRA ARAQUE, Lina María. y SÁNCHEZ GARCÍA, Diana Pilar. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. Municipio de Tuta Boyacá. p 78.

NIMBANDA Y SANTAMARIA ^[5], realizaron el diseño de una mezcla de concreto de alta resistencia utilizando EAFS como sustituto del agregado fino, para su posible implementación en pavimentos rígidos. La resistencia esperada del concreto de alta resistencia según los autores debe ser mínimo de 42 Mpa.

La dosificación empleada en la mezcla definitiva contenía 55% de material convencional y 45% de EAFS. Como no se incluyó material fino en la mezcla, se agregó un aditivo superplastificante, con la función de llenar los espacios que deja este material.

Se realizaron 4 mezclas de prueba donde se ajustó la R a/c. La mezcla definitiva implemento una R a/c de 0.36. Los resultados de la resistencia a la compresión (promedio de tres cilindros), muestran que a los 7 días se obtuvo un valor de 41.4 Mpa, es decir, el 98% de la resistencia esperada de diseño. A los 14 días, ya superaba la resistencia esperada con un valor de 45.7 Mpa, equivalentes a 109%, a la edad de 28 días de 118% y a la edad de 56 días de 119%, como se muestra en la figura 4.

El resultado de este estudio, cumple con los objetivos propuestos, verificando que la EAFS puede ser implementada en concreto y alcanzar una alta resistencia a la compresión a los 28 días, siguiendo la metodología de diseño ACI 211 4r – 93 y sin implementar material fino, sustituido por un contenido especificado de aditivo superplastificante

⁵ NINABANDA CANGO, Brian Ernesto. y SANTAMARÍA JEREZ, Karina Lorena. Diseño de hormigón rígido de alta resistencia utilizando escoria de acero para la aplicación en pavimento de concreto. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil. Quito (Ecuador). Universidad Central del Ecuador. 2017. 211 p.

Figura 4. Resultados de la resistencia a la compresión de la mezcla definitiva con escoria y grava sin arena R a/c 0.36.

Asentamiento: 3 cm		w/(c+p): 0.36							f'c: 42 MPa
Fecha de realización	Fecha de ensayo	Edad Días	Muestra N°	Diámetro Promedio (cm)	Área de Cilindro	Carga kg	Resistencia Compresión (kg/cm ²)	Promedio (MPa)	Porcentaje (%)
23/3/2017	30/3/2017	7	1	10.1	80.12	32200	401.9	41.4	98
23/3/2017	30/3/2017		2	10.3	83.32	35900	430.9		
23/3/2017	30/3/2017		3	10.3	83.32	36000	432.1		
23/3/2017	6/4/2017	14	4	10.3	83.32	37600	451.3	45.7	109
23/3/2017	6/4/2017		5	10.3	83.32	39500	474.1		
23/3/2017	6/4/2017		6	10.2	81.71	38500	471.2		
23/3/2017	20/4/2017	28	7	10.2	81.71	42700	522.6	49.6	118
23/3/2017	20/4/2017		8	10.2	81.71	40100	490.7		
23/3/2017	20/4/2017		9	10.2	81.71	40300	503.1		
23/3/2017	18/5/2017	56	10	10.2	81.71	42300	517.7	50.1	119
23/3/2017	18/5/2017		11	10.3	83.32	41900	502.9		
23/3/2017	18/5/2017		12	10.1	808.12	40900	510.5		

Fuente. Tomado de NINABANDA CANGO, Brian Ernesto. y SANTAMARÍA JEREZ, Karina Lorena. Diseño de hormigón rígido de alta resistencia utilizando escoria de acero para la aplicación en pavimento de concreto. p129.

1.2 ESTADO DEL ARTE DEL POLVO DE VIDRIO RECICLADO EN EL CONCRETO

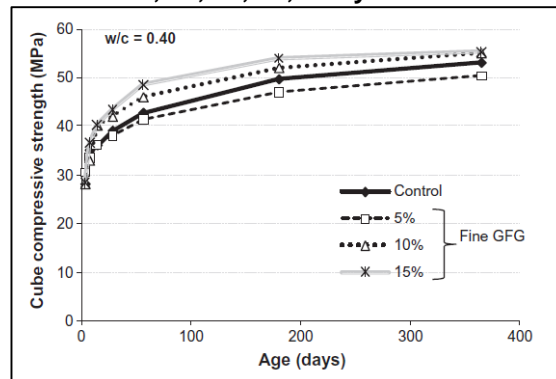
Este estudio realizado por ingenieros de la universidad de Kingston ^[6] implementó la sustitución tanto del agregado grueso como del agregado fino por vidrio reciclado. Para la sustitución del agregado fino por vidrio se tuvieron en cuenta los porcentajes en volumen: 5%, 10% y 15% para una R a/c de 0.40. En cuanto al agregado grueso se tuvieron en cuenta porcentajes de sustitución de grava por vidrio de 30%, 40%, 50% 60% y 100%, para R a/c de 0.40, 0.55, 0.62 y 0.76.

El análisis de la resistencia a la compresión se formuló en las edades de 3, 7, 14, 28, 60, 180 y 365 días. Los resultados obtenidos para la matriz fina con vidrio, arrojaron un mejor comportamiento en la mezcla que implementó el 15% de vidrio en sustitución de la matriz fina en porcentaje del volumen total, como lo muestra la figura 5.

En cuanto a la matriz gruesa se pudo observar que las mezclas con R a/c de 0.40, 0.55 y 0.62 tienen un comportamiento similar en cuanto a la resistencia a la compresión en las distintas edades y se pudo verificar que a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución del material convencional por vidrio, hay una disminución de la misma, como se muestra en la figura 6.

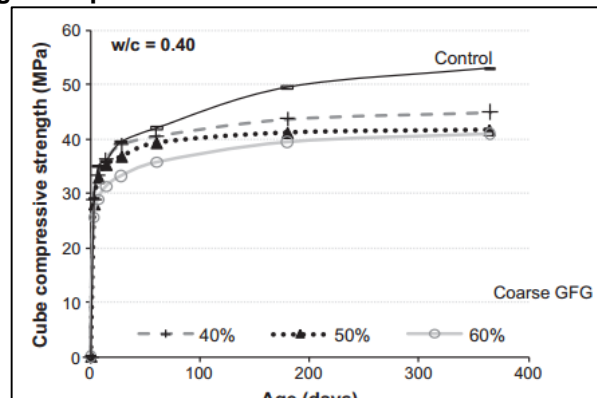
⁶ LIMBACHIYA, Mukesh; SEDDIK MEDDAH, Mohammed y FOTIADOU Soumela. Performance of granulated foam glass concrete. [desempeño del concreto con vidrio granulado] [base de datos en línea]. ELSERVIER Ltda. recibido en revisión el 24 de marzo de 2011. Aceptado el 5 de octubre de 2011. Disponible en <www.sciencedirect.com>

Figura 5. Resistencia a la compresión de las distintas mezclas diseñadas con vidrio en reemplazo del agregado fino a los 7, 14, 28, 60, 180 y 365 días.



Fuente. Tomado de LIMBACHIYA, Mukesh; SEDDIK MEDDAH, Mohammed y FOTIADOU Soumela. Performance of granulated foam glass concrete. [desempeño del concreto con vidrio granulado]., p5.

Figura 6. Resistencia a la compresión de los cilindros con R a/c 04 para las diferentes mezclas de sustitución matriz gruesa por vidrio.



Fuente. Tomado de: LIMBACHIYA, Mukesh; SEDDIK MEDDAH, Mohammed y FOTIADOU Soumela. Performance of granulated foam glass concrete. [desempeño del concreto con vidrio granulado]., p6.

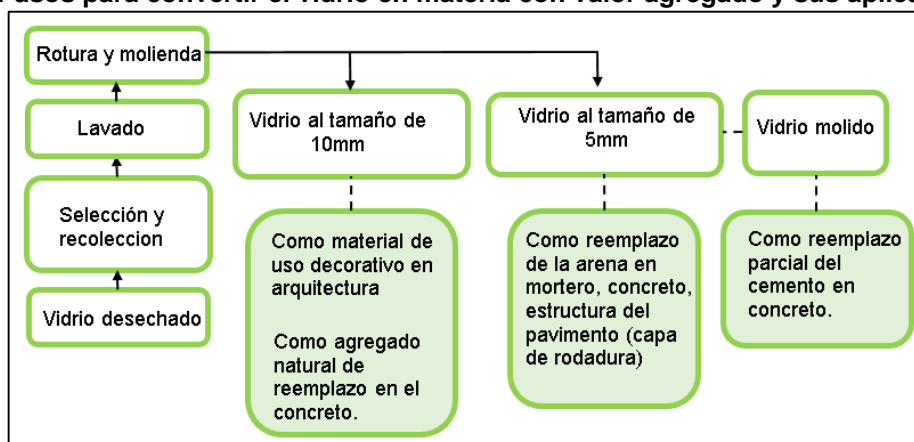
El documento publicado por la Universidad Politécnica de Hong Kong^[7], es una revisión de la situación actual del manejo del desperdicio del vidrio y las aplicaciones actuales en la industria de la construcción en esa ciudad, debido a que, según los autores, anualmente se producen 4500 toneladas de vidrio y solamente el 3.3% del vidrio es reusado y el 96.7% restante se desecha en los rellenos sanitarios y las aplicaciones en la construcción, se basan en la composición química del vidrio que, según los autores es de aproximadamente el 70% de sílice (SiO₂), lo que permite la tritución y molienda. Además su implementación

^[7] LING Tung-Chai. POON, Chi-Sun y WONG Hau-Wing. Management and recycling of waste glass in concrete products. Current situations in Hong Kong. [Manejo y reciclaje de desperdicio de vidrio en productos de concreto. Situación actual en Hong Kong] [Base de datos en línea]. 1^{ra} ed. Edgbaston, Birmingham, (Reino Unido). Publicado por Elsevier Ltda. 29 de octubre de 2012. Disponible online en <www.sciencedirect.com.>

al concreto o mortero como agregados no convencionales, en sustitución parcial del agregado convencional (agregado grueso o agregado fino).

El esquema de la figura 7, muestra el proceso del vidrio desde la recolección, selección, lavado, rotura y molienda, hasta las aplicaciones una vez llevado al tamaño deseado, presentado por los autores. Es relevante exponerlo, porque el manejo previo al vidrio fue similar al desarrollado en el presente trabajo de investigación.

Figura 7. Pasos para convertir el vidrio en materia con valor agregado y sus aplicaciones.



Fuente. Autores. Adaptado de LING Tung-Chai. POON, Chi-Sun y WONG Hau-Wing. Management and recycling of waste glass in concrete products. Current situations in Hong Kong. [Manejo y reciclaje de desperdicio de vidrio en productos de concreto. Situación actual en Hong Kong]. p 4.

El uso del vidrio para la elaboración de bloques de concreto, es una de las aplicaciones en la industria de la construcción que actualmente se desarrolla en un laboratorio de Hong Kong. Se reemplazó parcialmente el material convencional fino y grueso por el vidrio. Los resultados de tres estudios fueron presentados, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen de la recopilación hecha en el estudio para Hong Kong. Porcentaje de reemplazo de agregado fino y grueso por vidrio y las resistencias pertinentes.

Autor	Tamaño de vidrio usado	Tipo de reemplazo	R a/c	% de Reemplazo	Resistencia a la compresión a los 28 días Mpa
Lam et al (2007)	Pasa tamiz #4	Agregado fino	-	25	56
				50	54
				75	57

Tabla 2. Continuación

Autor	Tamaño de vidrio usado	Tipo de reemplazo	R a/c	% de Reemplazo	Resistencia a la compresión a los 28 días Mpa
Turgut (2008)	Pasa tamiz # 16	agregado grueso	0.3	0	27.5
				6.2	30.7
				9.4	33.3
Turgut and Yahizade (2009)	Pasa tamiz #16	agregado fino	0.35	0	23.5
				20	39.7
				30	28.8
	Retiene # 4	agregado grueso		20	25.2
				30	31.5

Fuente. Autores. Adaptado de LING Tung-Chai. POON, Chi-Sun y WONG Hau-Wing. Management and recycling of waste glass in concrete products. Current situations in Hong Kong. [Manejo y reciclaje de desperdicio de vidrio en productos de concreto. Situación actual en Hong Kong]. p 4.

JANI Y HOGGLAND ^[8] , desarrollaron una revisión de las investigaciones recientes sobre el vidrio reciclado como sustituto parcial del agregado fino y grueso y del cemento en mezclas de concreto. En lo referente al vidrio como agregado en el concreto se pudo determinar que la resistencia a la compresión disminuía a medida que se iba aumentando la cantidad de material en reemplazo del material convencional grueso, llegando a estimar que al aumentar la cantidad del vidrio al 60% la resistencia disminuía en 49%. Sin embargo, mencionan a otro investigador que logró verificar que la resistencia a la compresión aumentaba al llevar el porcentaje de reemplazo del agregado grueso por vidrio a un 20%.

Finalmente se pudo determinar, según esta recopilación de estudios a nivel global, que los tamaños de las partículas de vidrio influyen directamente en los resultados de la resistencia a la compresión: entre más pequeñas las partículas de vidrio mayor resistencia.

1.3 ESTADO DEL ARTE DE EAFS Y PVR EN CONCRETO

Los materiales no convencionales utilizados en las mezclas de concreto, para el estudio realizado en la universidad occidental de Sydney Australia^[9], fueron escoria de horno de

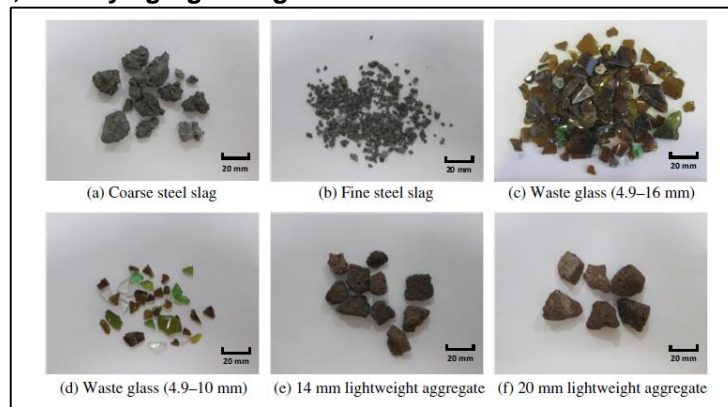
⁸ JANI Yahya y HOGGLAND William. Waste glass in the production of cement and concrete – A review [desperdicio de vidrio en la producción de cemento y concreto - una revisión]. [base de datos en línea]. Documento de revisión. 1^{ra} edición. Kalmar (Suecia). Publicado por Elsevier Ltd. Aceptado el 20 de marzo del 2014. Disponible en internet www.sciencedirect.com.

⁹ YU Xin, *et al.* Performance of concrete made with steel slag and waste glass. [desempeño del concreto hecho con scoria de acería y desperdicio de vidrio]. [Base de datos en línea]. 1^{ra} ed. Penrith (Australia). Publicado por Elsevier Ltda. 6 de abril de 2016. Disponible en internet www.sciencedirect.com.

arco eléctrico, EAFS y vidrio reciclado fracturado a determinado tamaño. Se manejaron dos tamaños de escoria, dos de vidrio, y dos de una grava volcánica denominada como agregado grueso ligero o poco denso (1.47 g/cm^3), como se puede ver en la imagen 1.

La metodología implementada abarca dos grupos de mezclas, la primera con una R a/c de 0.55 y la segunda con una R a/c de 0.42. Estos grupos de mezclas a su vez tienen unas variaciones en la composición granular fina y gruesa, como se puede detallar en la tabla 3 y tabla 4, por los materiales no convencionales mencionados.

Imagen 1. Escoria, vidrio y agregado ligero a diferentes tamaños usado en el estudio.



Fuente. Tomado de YU Xin, *et al.* Performance of concrete made with steel slag and waste glass. [desempeño del concreto hecho con scoria de acería y desperdicio de vidrio]., p 5.

Tabla 3. Mezclas en dos lotes según la relación agua/cemento.

LOTE 1	
relación a/c	0.55
Mezcla	Descripción
NC-1	mezcla convencional con grava de 20mm
LWC-1	agregado ligero (poco denso) 14- 20 mm en reemplazo de la grava
CSSC-1	escoria gruesa (4.9 - 20 mm) reemplazo de agregado grueso
SSGC-1	vidrio grueso (4.9 - 16 mm) en reemplazo parcial del AG (16.5%) escoria 83.5%

Fuente. Basados en YU Xin, *et al.* Performance of concrete made with steel slag and waste glass. [desempeño del concreto hecho con escoria de acería y desperdicio de vidrio].

Tabla 4. Mezclas en dos lotes según la relación agua/cemento.

LOTE 2	
relación a/c	0.4
NC-2	mezcla convencional con grava de 20mm
LWC-2	agregado ligero (poco denso) 14- 20 mm en reemplazo de la grava
CSSC-2	escoria gruesa (4.9 - 20 mm) reemplazo de agregado grueso
SSGC-2	vidrio grueso (4.9 - 16 mm) en reemplazo parcial del AG (16.5%) escoria 83.5%
FSSC	Vidrio fino (pasa 4.9 mm) reemplaza todo el fino

Fuente. Basados en YU Xin, *et al.* Performance of concrete made with steel slag and waste glass. [desempeño del concreto hecho con escoria de acería y desperdicio de vidrio].

Una de las conclusiones del estudio es que las propiedades mecánicas del concreto aumentan con la inclusión de escoria de tamaño grueso, además se incrementa favorablemente la trabajabilidad del concreto en mezclas que contienen vidrio. Se concluyó también que es desfavorable reemplazar el agregado fino por escoria en proporciones elevadas pues tiende a disminuir la resistencia a la compresión y a la flexotracción.

2. MARCO CONCEPTUAL

Se presentan los siguientes conceptos para el presente trabajo de investigación.

2.1 VIDRIO

El vidrio es un material compuesto en gran medida por sílice y óxido de calcio, producto de la fusión a altas temperaturas de arena silícea, carbonato de sodio y carbonato de calcio. Se dice que no tiene estructura cristalina porque en el enfriamiento, es decir en el estado de solidificación no se produce la cristalización ^[10]. No tiene una estructura definida, es decir es un material considerado como amorfo. La composición química del vidrio se consultó de 3 documentos científicos especializados en el manejo del vidrio y se resume en la tabla 5.

Tabla 5. Composición química del vidrio según 3 artículos científicos.

Autor	Compuesto químico(%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Rashidian ; Afshinnia y Rao ¹¹	69.6	2.2	0.9	11.6	0.4	12.03	0.4
Souza Marcelo T. et al ¹²	70.2	2.1	0.1	9.5	0.6	16.6	-
Lee Hyeonggi et al ¹³	66.8	10.1	0.6	10.8	-	8.4	0.9

Fuente. Autores. Adaptación de documentos consultados.

El vidrio está compuesto en gran porcentaje por Sílice, casi el 70% (SiO₂), Óxido de sodio (Na₂O) 12% en promedio, Óxido de calcio (CaO), Alumina (Al₂O₃), Óxido de magnesio (MgO), Óxido de hierro (Fe₂O₃) y Óxido de potasio (K₂O).

¹⁰ PEREZ ROJAS, Yasmin Andrea. Desempeño de adiciones en concretos con EAFS y protección del acero de refuerzo. Propuesta de trabajo doctorado en ingeniería y ciencia de materiales. Tunja (Colombia). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2016. 33 p.

¹¹ RASHIDIAN DEZFOULI, Hassan; AFSHINNIA, Kaveh y RAO RANGARAJU, Prasada. Efficiency of ground glass fiber as a cementitious material, in a mitigation of alkali-silica reaction of glass aggregates in mortars and concrete. [eficiencia de fibras de vidrio redondeadas como material cementante en la mitigación de la reacción álcali-silice de vidrio como agregado en mortero y concreto] [base de datos en línea]. 1^{ra} ed. Clemson (Estados Unidos). Publicado por Elsevier Ltda. Recibido el 6 de julio de 2017. Publicado el 28 de noviembre de 2017.

¹² SOUZA, Marcelo T. *et al.* Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes. [Espumas de vidrio producidas a partir de botellas de vidrio y residuos de cáscara de huevo]. [base de datos en línea]. Santa Catarina (Brasil). Publicado por Elsevier B.V. recibido en revisión el 24 de mayo de 2017. Aceptado el 15 de junio de 2017.

¹³ LEE Hyeonggi *et al.* Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. [Evaluación del desempeño del concreto incorporando polvo de vidrio reciclado como material cementante complementario]. [base de datos en línea. República de Corea. Recibido para revisión el 10 de agosto de 2017. Aceptado el 3 de septiembre de 2017.

2.2 ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

La escoria de horno de arco eléctrico (EAFS) es considerado un desecho de la industria siderúrgica, que ha sido ampliamente investigado para su aplicación a obras civiles en el concreto como sustituto del agregado grueso y que se produce por la fusión de acero. Es un material rocoso que puede variar en su tamaño y composición de acuerdo al tipo de acero, los materiales refractarios del horno y avances tecnológicos ¹⁴.

Imagen 2. Escoria de horno de arco eléctrico (EAFS).



Fuente. Tomado de COPPOLA L. *et al.* Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. [Escoria de horno de arco eléctrico para concreto sostenible]. p 2.

La composición química del vidrio se puede observar en la tabla 6, como resultado de la consulta de 3 documentos de investigación centrados en el estudio de la EAFS.

Tabla 6. Composición química de la EAFS.

Autor	Compuesto químico (%)								
	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	AlO ₃	MgO	MnO	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂
Perez Yasmin ¹⁵	38.80	26.70	14.00	7.00	4.00	6.68	0.33	-	0.58
Arribas Idoia et al ¹⁶	30.8	32.52	17.17	7.96	4.56	3.8	0.25	0.58	0.59
Ozturk Murtar ¹⁷	31.69	34.88	18.73	11.57	6.7	2.64	0.74	0.34	0.38

Fuente. Autores. Adaptación de documentos consultados.

¹⁴. Op., cit COPPOLA L. *et al.*

¹⁵ PEREZ ROJAS, Yasmin Andrea. *et al.* Preparation of concrete mixtures with electric arc furnace slag and recycled ground [Preparación de mezclas de concreto con escoria de horno de arco eléctrico y vidrio molido reciclado]. Publicado por IOP publishing Ltda. Mayo de 2017.

¹⁶ ARRRIBAS, Idoia, *et al.* Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. [escoria de horno de arco eléctrico y su uso en concreto hidráulico] [Base de datos en línea]. Santander (España). Publicado por Elsevier Ltda. Recibido en revisión el 16 de marzo de 2016. Aceptado el 1 de mayo de 2016. Disponible en www.sciencedirect.com.

¹⁷ OZTURK Murtar, *et al.* Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag. [Trabajo experimental sobre propiedades de eficacia de blindaje mecánico, electromagnético y de microondas de mortero que contiene escoria de horno de arco eléctrico] [base de datos en línea]. Iskenderun (Turquía). Publicado por Elsevier Ltda. recibido en revisión el 28 de diciembre de 2017. Aceptado el 4 de junio de 2018.

2.3 AGREGADOS

Conjunto de materiales de composición mineral, naturales o artificiales, generalmente inertes, usados en la construcción de obras civiles¹⁸. La importancia de los agregados en el concreto es fundamentalmente por el volumen que ocupan (estimado entre el 65% y el 85%). De este factor se deriva la economía, durabilidad y estabilidad de las obras civiles.

2.3.1 Agregado grueso o grava. Material retenido en el tamiz No. 4, con un tamaño entre 7.6 cm y 4.76 mm.¹⁹

2.3.2 Agregado fino o arena. Material pasante de la malla No. 4 y retenido en la malla No. 200, con tamaños entre 4.76 mm y 74 Mieras (0.074 mm).

2.4 CEMENTO

La Norma Técnica Colombiana NTC 31, define el cemento como un material pulverizado, que contiene óxido de calcio, sílice alúmina y óxido de hierro²⁰, formada de arcilla y materiales calcáreos, sometida a cocción, el cual, al ser mezclado con agua genera una pasta que se endurece y al ser adicionado con grava y arena produce el hormigón o concreto hidráulico²¹.

En junio de 2014, se hizo la tercera actualización de la NTC 121, en la cual se definen los tipos de cemento con una nueva nomenclatura basado en las características especiales de cada cemento, se muestra en la tabla 7, el resumen de la nueva clasificación para los cementos en Colombia.

Tabla 7. Tipos de cemento.

CEMENTO		CARACTERÍSTICAS
TIPO UG	Uso General	Cemento hidráulico para construcción general. Se utiliza cuando no sean requeridos los tipos de cemento especiales.

¹⁸ GUTIERREZ, Libia de López. El concreto y otros materiales para la construcción. 2^{da} ed. Manizales (Colombia). Marzo de 2003. [citado el 3 de febrero de 2018]. Capítulo 1. Agregados. p 9

¹⁹ Ibid., p9

²⁰ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería civil y arquitectura. Cemento. Definiciones. Tercera actualización. NTC 31. Bogotá. El instituto. 18 de junio de 2014.

²¹ REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Diccionario de la lengua española. 23^{va} edición. Definición cemento, Diccionario de la Real Academia Española. Madrid (España). Editorial Espasa. 2014. 2432 p.

Tabla 7. Continuación.

CEMENTO		CARACTERÍSTICAS
TIPO ART	Alta Resistencia Temprana	Es usado en la elaboración de concretos y morteros en plantas concreteras y centrales de mezcla, estructuras de concreto con requisitos de rápida puesta en servicio, producción de concreto para altas solicitudes estructurales.
TIPO MRS	Moderada Resistencia a los Sulfatos	Utilizado en la producción de concretos con requerimientos de desempeño moderados en resistencias a la compresión y a sulfatos, producción de concretos para cimentaciones, estructuras, rellenos y todo tipo de obra en general.
TIPO ARS	Alta Resistencia a los Sulfatos	Concretos fabricados para ambientes agresivos (sulfatos en suelos o en agua de mar), obras como canales, alcantarillas, obras portuarias y plantas de tratamiento de agua.
TIPO MCH	Moderado Calor de Hidratación	Usados en concretos con requerimientos de desempeño moderados en calor de hidratación, ideal en la construcción de puentes y tuberías de concreto.
TIPO BCH	Bajo Calor de Hidratación	Para concretos que requieren bajo calor de hidratación en obras donde no se deben producir dilataciones durante el fraguado, ni retracciones durante el secado, ideal en la construcción de estructuras de gran volumen como presas, muros, diques, entre otros.

Fuente: Elaboración propia. Basados en la Norma Técnica Colombiana NTC 121 (tercera actualización), 18 de junio 2014.

3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES PARA MEZCLA DE CONCRETO

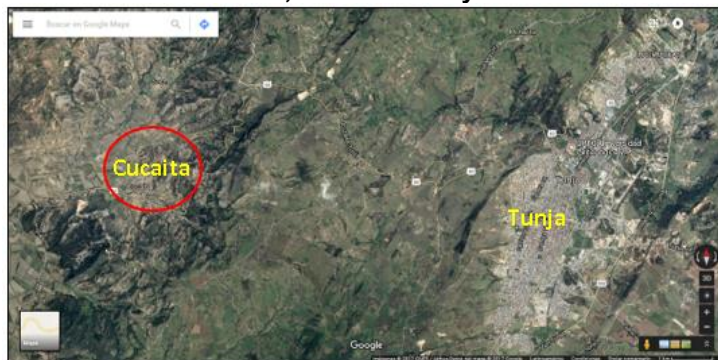
En el presente capítulo se hace una síntesis del proceso y medición de las características físicas y mecánicas de los materiales implementados en la fabricación de la mezcla de concreto hidráulico, tanto convencional como no convencional. Las Especificaciones de Construcción del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) 2013, serán el documento maestro con el que se llevara un control de calidad a los agregados que estarán presentes en la mezcla.

Por esta razón se presentan a continuación los aspectos propios de la caracterización, definidos en el artículo 500 de las especificaciones de construcción del INVIAS del año 2013, con vigencia actual para Colombia, en donde se establecen todos los parámetros necesarios para la aceptación del uso de dichos materiales en la composición de la mezcla. Se expresarán los datos de acuerdo a las características propias de cada agregado.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS GRUESOS.

Para el estudio, se establecerán la grava y la escoria de horno de arco eléctrico (EAFS) como agregados gruesos. Se elige la grava proveniente de la cantera de explotación llamada “Agregados Santa Lucia” ubicada en el municipio de Cucaita – Boyacá a 18 km de la ciudad de Tunja, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Ubicación cantera Santa Lucia, Cucaita – Boyacá.



Fuente: Extraída de Google Earth.

La escoria de horno de arco eléctrico, EAFS, proviene de la planta GERDAU DIACO, localizada en la vía, Tunja – Paipa, dentro de la jurisdicción de los municipios de Tuta y Sotaquirá en el departamento de Boyacá, en la figura 9.

Figura 9. Localización de la planta Gerdau Diaco, Tuta, Boyacá.



Fuente. Autores. Adaptada de Google Maps.

3.1.1 Análisis granulométrico del agregado grueso, INV E 213-13. Este procedimiento caracteriza los tamaños que conforman el agregado grueso mediante el tamizado de sus partículas, para el caso específico se usó una muestra representativa determinada por la norma de 5 kg, como se muestra en la tabla 8, la cual indica la granulometría del agregado grueso.

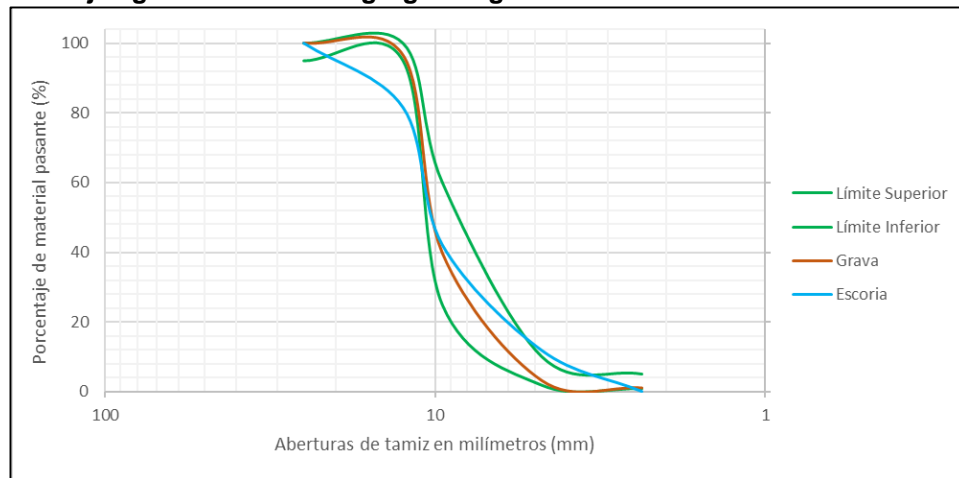
Tabla 8. Gradación de la grava y la escoria.

Abertura de Tamiz (mm)	Gradación de trabajo (%Pasa)		Gradación Grava	Gradación Escoria
	Li	Ls		
25	95	100	100.00	100.00
12.5	95	100	96.48	81.52
9.5	25	60	39.68	42.05
4.75	2	10	3.14	11.79
2.36	0	5	0.95	0.00

Fuente. Autores.

En la gráfica 1 se observa la franja granulométrica de los agregados gruesos.

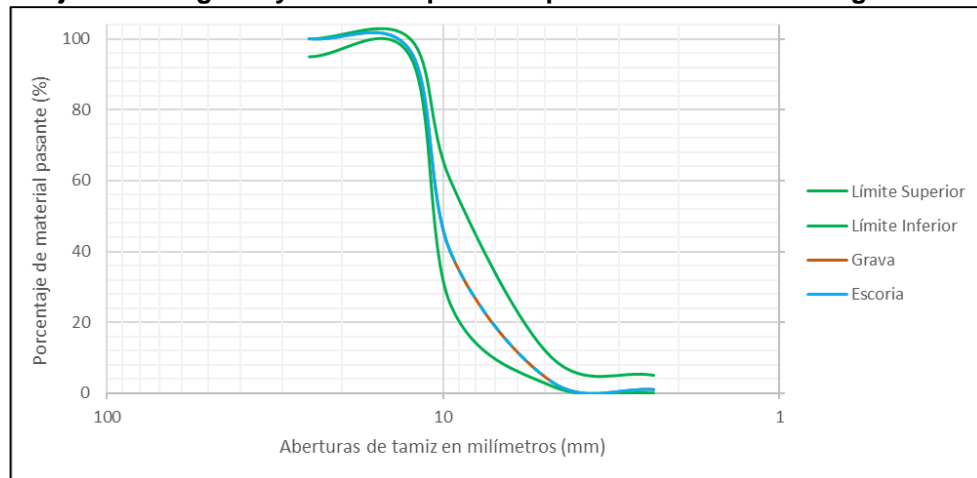
Gráfica 1. Franjas granulométricas agregados gruesos.



Fuente. Autores.

Al obtener la gradación de los agregados gruesos se evidencio la necesidad de realizar un ajuste que permitiera llevar la escoria a los límites recomendados por INVIAS para el agregado grueso, de tal forma que su gradación concordara con el rango pre establecido y de esta manera cumplir con el artículo 500 y la tabla 500-3 “Granulometrías para el agregado grueso para pavimentos de concreto hidráulico” de la Especificación de Construcción, en la gráfica 2.

Gráfica 2. Ajuste de la grava y la escoria para cumplimiento de la norma vigente.



Fuente. Autores.

Se ajustaron los materiales al mismo módulo de finura de tal forma que cumpliera la especificación correspondiente.

3.1.2 Desgaste en la máquina de los Ángeles, INV E 218-13. Para la grava se obtuvo un resultado de degradación en la máquina de los ángeles de 36%, teniendo en cuenta que el porcentaje de aceptación es de 40%, según los requisitos para el agregado grueso para concreto hidráulico, de la tabla 500 – 4, del capítulo 5, de las especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS 2013. La escoria, presentó un desgaste de 19.68%, luego del ensayo, cumpliendo los requerimientos especificados.

3.1.3 Degradación por abrasión en el equipo Micro – Deval, INV E 238-13. El porcentaje de desgaste Micro Deval para la grava, luego del ensayo es de 24%, mientras que el de la escoria es de 7%, el requerimiento de la tabla 500-4 de la especificación general de construcción de carreteras INVIAS 2013, capítulo 5 es de 30% máximo de desgaste en el agregado grueso.

3.1.4 Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, INV E 224-13. Se realizaron dos muestras de las cuales, en la primera se obtuvo un porcentaje de finos de 7.83% y para la segunda 8.18%. Con estos valores y la fuerza aplicada en el equipo universal de compresión, se obtuvo para la muestra 1, 97.49 kN y para la muestra 2, 91.10 kN.

El promedio redondeado a múltiplo de 5 para el ensayo del agregado convencional es de 95 kN. Para la EAFS, de igual manera se tienen dos muestras: la muestra 1 tuvo un porcentaje de finos de 9.3% y la muestra 2, 9.4%. La fuerza calculada para la muestra 1 es de 102.37 kN y para la muestra 2 de 99.24 kN. El promedio redondeado al múltiplo de 5 da un resultado para el ensayo de 105 kN. Parte del procedimiento se detalla en la imagen 3.

Imagen 3. Procedimiento para determinar el 10% de finos en el agregado grueso.



Fuente. Autores.

3.1.5 Pérdida en el ensayo de solidez en sulfato de magnesio, INV. E 220-13. El ensayo simula la acción de la intemperie a los materiales, simulando un comportamiento en condiciones reales de servicio. La pérdida de material bajo acción del sulfato de magnesio promedio de todas las muestras será el valor definitivo del ensayo. La cantidad o muestra del material se especifica como un peso mínimo necesario para cada tamiz, para este caso: 300g para la fracción del tamiz No. 4, 1000g para la fracción de 19 mm (3/4") y 1500 g para la fracción de 37.5 mm (1 -1/2"). Ver imagen 4.

Imagen 4. Escoria y grava en solución e sulfato de magnesio.

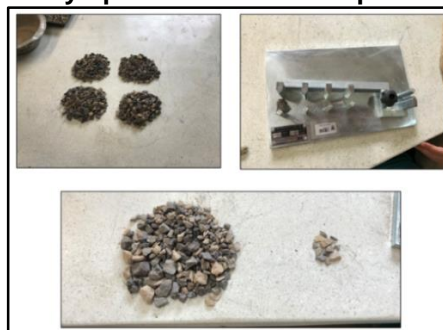


Fuente. Autores.

La pérdida de solidez por acción del sulfato de magnesio en la grava, como resultado del ensayo es de 2.46% y para la escoria es de 1.66%, cumpliendo con el requisito especificado en la tabla 500-4, especificaciones generales de construcción de carreteras, capítulo 5, INVIAS, 2013, de máximo 15%, como perdida en sulfato de magnesio.

3.1.6 Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos INV E 240 -13. El resultado obtenido fue de 94% de partículas no planas ni alargadas, como se ve en la imagen 5.

Imagen 5. Procedimiento de ensayo para determinar las partículas planas y alargadas.



Fuente. Autores.

3.1.7 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV E 227 – 13. El objetivo de este ensayo es tener un dato de la posible resistencia al corte que pueda presentar el material de acuerdo al porcentaje de partículas fracturadas, pues a mayor cantidad de partículas fracturadas mayor fricción y textura de partículas, el procedimiento se puede verificar en la imagen 6. La muestra mínima especificada en la norma, numeral 6.2 es de 1500 g para el tamaño máximo nominal de partículas de $\frac{3}{4}$ ". Se trata de una inspección visual de la muestra determinando cuales partículas tienen caras fracturadas y cuáles no. En el capítulo 500 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías, INVIAS, 2013, especifica que el ensayo de porcentaje de partículas fracturadas de un agregado grueso INV E 227 – 13, se debe realizar a la combinación de agregados. Para este caso la muestra de 1500g se compone de 75% grava (1125g) y 25% EAFS (375g).

El resultado del ensayo fue, 90% de partículas fracturadas.

3.1.8 Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados INV E - 211- 13. Algunos agregados presentan una propiedad negativa en cuanto a partículas que se pueden pulverizar con los dedos, o con alguna fuerza de compresión mínima, generando resultados adversos en la construcción de concreto hidráulico. Por esta razón es importante realizar este ensayo que permite aprobar el material a utilizar en la mezcla. El capítulo 500 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS 2013, especifica que el ensayo de determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados INV E - 211- 13, se debe realizar a la combinación de agregados. En la tabla 9 se observa el tamaño de muestra que indica la norma para el desarrollo del ensayo.

Tabla 9. Combinación de agregados para la determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados.

Retiene tamiz #	Muestra (g)	Grava (g)	EAFS (g)
4	1000	750	250
3/8"	2000	1500	500
3/4"	3000	2250	750

Fuente. Autores.

3.1.9 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso, INV E – 223 -13. Aunque este ensayo no está en la tabla 500.4, de las Especificaciones Generales de Construcción De Carreteras, es necesario para el diseño de la mezcla según el método ACI 211.1. La importancia del método radica en estipular cuatro aspectos fundamentales para el diseño: calcular el volumen que ocupa el agregado (gravedad específica), cálculo de vacíos del agregado (gravedad específica), la absorción. (gravedad específica SSS) y para diseños con agregados secos (gravedad específica en condición seca SH). Ver imagen 6.

Imagen 6. Preparación y realización ensayo de densidad, densidad relativa (gravedad específica y absorción del agregado grueso).



Fuente. Autores.

El resultado obtenido para el ensayo se presenta en tabla 10.

Tabla 10. Resultado del ensayo de densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.

Parámetro	Grava	EAFS	Grava 75% - EAFS 25%
Gravedad específica bulk (g/cm^3)	2.56	3.5	3.21
Gravedad específica bulk sss (g/cm^3)	2.39	3.41	2.99
Gravedad específica aparente (g/cm^3)	2.29	3.37	3.06
Absorción (%)	4.6	1.1	2.3

Fuente. Autores

La tabla 11 muestra un resumen del control de los ensayos al agregado grueso de acuerdo a la tabla 500-2 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS 2013, en donde se observa el requisito, el resultado y la observación pertinente para cada ensayo.

Tabla 11. Control del agregado grueso según la tabla 500-2 de las Especificaciones Generales de construcción de carreteras, INVIAS 2013

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV - 13	REQUISITO	RESULTADO		OBSERVACIÓN
			GRAVA	ESCORIA	
DUREZA					
Desgaste en la máquina de los Ángeles (gradación A), máximo (%) 500 revoluciones 100 revoluciones	E-218	40 8	36	20	CUMPLE -
			-	-	
Degradación por abrasión en el equipo Micro - Deval, máximo (%)	E-238	30	24	7	CUMPLE
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos Valor en seco, mínimo (KN) Relación húmedo/seco, mínimo (%)	E-224	90 75	95 -	105 -	CUMPLE -
DURABILIDAD					
Perdidas en el ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) Sulfato de sodio Sulfato de magnesio	E-220	10 20	- 2.46	- 1.66	- CUMPLE
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS					
Proporción de sulfatos del material combinado, expresado como SO4, máximo (%)	E-233	1.0	-	-	-
Reactividad álcali - agregado grueso y fino: concentración SiO2 y reducción de alcalinidad R	E-234	SiO2 ≤ R cuando R ≥ 70 SiO2 ≤ 35 + 0.5R cuando R < 70	-	-	-
LIMPIEZA (requisito a la combinación de agregados 25% EAFS – 75% grava)					
Terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	E-211	3.0	2.8		CUMPLE
Partículas livianas, máximo (%)	E-221	0.5	-		-
GEOMETRÍA (requisito a la combinación de agregados 25% EAFS – 75% grava)					
Partículas fracturadas mecánicamente (una cara), mínimo	E-227	60	90		CUMPLE
Partículas planas y alargadas (relación 5:1), máximo (%)	E-240	10	3.91		CUMPLE

Fuente. Autores.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS FINOS:

El agregado fino convencional elegido para la conformación de la mezcla es arena proveniente del Alto del Moral, cantera ubicada a 15 km al sur de la ciudad de Tunja. En cuanto al agregado fino no convencional, se usó el material producido por la molienda mecánica de vidrio reciclado, siendo las botellas la fuente de material reciclado que se utilizó.

Se establecen los siguientes ensayos para caracterizar el agregado fino convencional y no convencional:

3.2.1 Análisis granulométrico del agregado fino, INV E 213-13. Este tamizado se hizo para ambos agregados finos, la arena y la arena de vidrio, el cual fue el producto obtenido después del proceso de molienda mecánica realizado al material elegido reciclado y llevándolo a la finura encontrada en la arena.

El artículo 500 de las especificaciones de construcción del INVIAS, en la tabla 500-1, llamada “Granulometría para el agregado fino para pavimentos de concreto hidráulico” permite confirmar la pertinencia del material para la conformación de la mezcla de concreto.

Se determinó entonces las granulometrías de cada material, en la tabla 12.

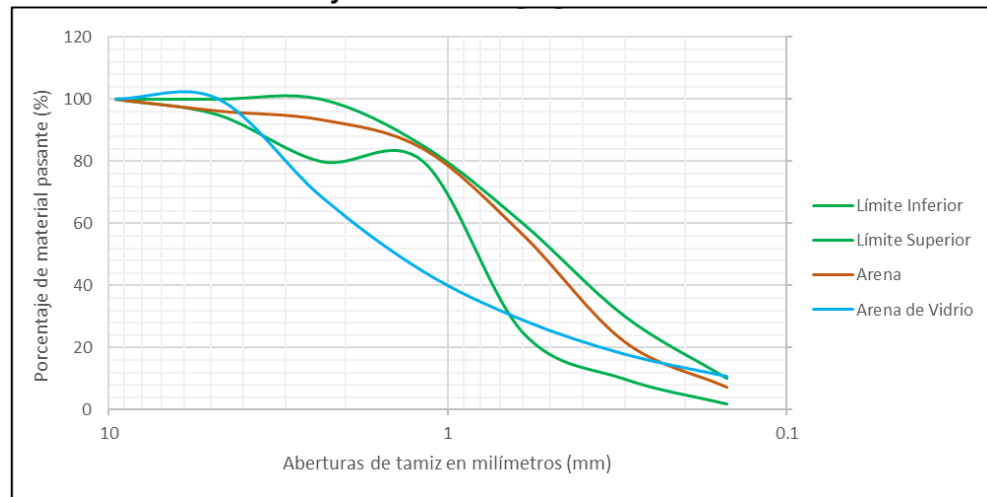
Tabla 12. Gradación de la arena y del vidrio.

Abertura de Tamiz (mm)	Gradación de trabajo (%Pasa)		Gradación Arena	Gradación Arena de Vidrio
	Li	Ls		
9.5	100	100	100.00	100.00
4.75	95	100	96.24	100.00
2.36	80	100	93.44	68.57
1.18	80	85	84.08	44.47
0.6	25	60	56.40	28.80
0.3	10	30	21.80	17.80
0.15	2	10	7.20	10.67

Fuente. Autores.

La granulometría de la arena de vidrio se ajustó con el fin de obtener un tamaño de partícula igual al de la arena. Se observa, en la gráfica 3 que la granulometría natural de la arena cumple con la gradación específica que determina la norma, siendo este un material adecuado para la conformación de la mezcla.

Gráfica 3. Gradación de la arena y del vidrio.

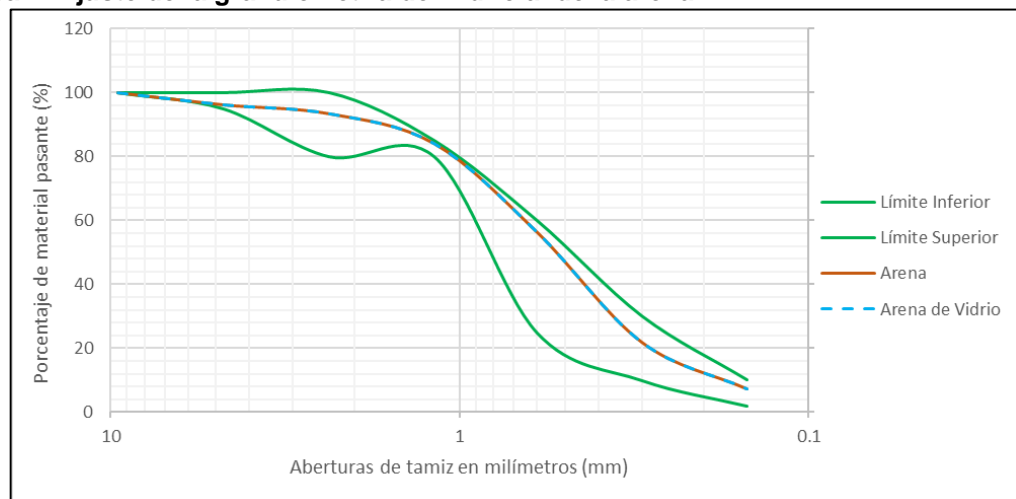


Fuente. Autores.

En cuanto al vidrio, fue necesario realizar un ajuste en la granulometría, de esta manera se logró obtener una nueva granulometría que quedo de igual tamaño que la arena, por lo cual se hace referencia a la misma como 'arena de vidrio'.

Para realizar este proceso se determinó los módulos de finura de cada agregado por separado y con esto llevar la finura del vidrio molido a la finura de la arena, modificando en proporción la cantidad que cada tamiz retuvo en ese ensayo, con lo cual se define la siguiente granulometría para agregados finos, la cual se muestra en la gráfica 4.

Gráfica 4. Ajuste de la granulometría del vidrio al de la arena.



Fuente. Autores.

3.2.2 Pérdida en el ensayo de solidez en sulfatos, INV E 220-13. La pérdida de solidez en sulfato de magnesio para la arena, fue de 1.74%, cumpliendo con la especificación, que en la tabla 500-2 del capítulo 5, especifica como valor de aceptación la perdida de solidez en sulfato de magnesio máximo del 15%, por lo que el material ha pasado la prueba. La imagen 7 muestra el agregado fino en inmersión en sulfato de magnesio.

Imagen 7. Agregado fino en inmersión en sulfato de magnesio.



Fuente. Autores.

3.2.3 Índice de plasticidad, INV E 125 y 126 -13. El índice de plasticidad hace referencia al rango de humedades que soporta un suelo cuando se encuentra en estado plástico, se determina haciendo una diferencia matemática entre el límite líquido y el límite plástico del material, los cuales se miden a partir de los “Límites de Atterberg” el cual definió los límites de consistencia para suelos finos, esto con el fin de marcar unas barreras visibles en el comportamiento de suelo a los cambios graduales de humedad.

En la imagen 8 se puede ver el procedimiento de laboratorio para este ensayo.

Imagen 8. Índice de plasticidad y límites de Atterberg.



Fuente. Autores.

Para el material fino usado en la conformación de la mezcla, se determinó el límite líquido usando la cazuela de Casagrande; en cuanto al límite plástico fue imposible realizar los testigos conocidos como “rollitos”, por lo cual no se logró determinar este valor, arrojando

como resultado que el material es no plástico NP, valor esperado y exigido por las especificaciones de construcción del INVIAS.

3.2.4 Equivalente de arena, INV E 133-13. El objeto de este ensayo es determinar la proporción de arcillas o polvos finos plásticos en el agregado fino, las cuales pueden ser nocivas para la conformación de la mezcla de concreto, por lo cual se consideran indeseables. La imagen 9 indica el procedimiento para determinar el equivalente de arena.

Imagen 9. Ensayo de equivalente de arena.



Fuente. Autores.

El valor promedio obtenido en el ensayo fue de 64% indicando la proporción de partículas arcillosas en el agregado fino, INVIAS recomienda como valor promedio de aceptación mínimo un 60% para el equivalente de arena. La tabla 13 muestra las lecturas con el resumen del ensayo.

Tabla 13. Resultados del ensayo de equivalente de arena.

N°	Lectura de arcilla (pulg)	Lectura de arena (pulg)	Equivalente de arena (%)	Equivalente de arena Promedio (%)
1	4.8	3.1	65	64
2	4.8	3.0	63	
3	4.9	3.1	64	
4	4.9	3.0	62	

Fuente. Autores.

3.2.5 Terrones de arcilla y partículas deleznales, INV. E 211-13. Al igual que el ensayo de equivalente de arena, este ensayo busca determinar la limpieza del agregado fino, determinando en masa la cantidad de material que se pierde al realizar un cribado por lavado en los tamices de control definidos por la norma, esto después de hacer una saturación previa del material inmerso en agua durante 24 horas, para finalmente hacer la medición del material retenido luego del lavado y secado al horno durante 24 horas. Se obtuvo un valor de 0.8% de partículas deleznales en el agregado fino, teniendo como límite máximo 3%, según el INVIAS. La imagen 10 muestra el tamizado por lavado.

Imagen 10. Lavado del material en tamiz especificado para determinar terrones de arcilla y partículas deleznales.



Fuente. Autores.

El valor obtenido de pérdida de material en el agregado fino fue de 2.8% después del proceso de lavado, tamizado y secado.

3.2.6 Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz 75 μm (No. 200) mediante lavado, INV. E 214-13. Este ensayo consiste en determinar la cantidad de limo, arcilla y polvo en el agregado fino, mediante un lavado, teniendo una mayor precisión de la información con respecto al material que pasa el tamiz No. 200 en comparación con el tamizado en seco. La muestra mínima para la realización del ensayo, es de 300g, según el numeral 5.2 de la norma INV. E 214- 13. El procedimiento se ilustra en la imagen 11.

Imagen 11. Lavado del material en tamiz No. 200.



Fuente. Autores.

El resultado de este ensayo es 2.8% de material que pasa el tamiz No. 200, por lavado.

3.2.7 Absorción de agua, INV E 222-13. La absorción que presente el agregado fino es un parámetro primordial en el estudio y posterior diseño de la mezcla de concreto, siendo este una de las variables más sensibles por los cambios físicos y químicos internos que soporta la mezcla al momento de ponerse en estado de fraguado y posterior curado, por lo cual es necesario hacer un control estricto de la absorción que sufre el material. Para el caso particular, es necesario realizar el ensayo a la arena y también a la arena de vidrio; adicionalmente se debe calcular la gravedad específica de cada uno de los agregados finos y también de las mezclas propuestas objeto del actual proyecto de investigación, esto debido a que es un parámetro para el diseño de las mezclas. Se establecerán los valores de la gravedad específica en términos de gravedad específica bulk, gravedad específica bulk sss y gravedad específica aparente. Los resultados obtenidos se sintetizan en la tabla 14. La imagen 12 muestra la secuencia del proceso para gravedad específica.

Tabla 14. Absorción de agregado fino convencional (arena) y no convencional en proporciones de mezcla (arena a determinado porcentaje de vidrio).

Parámetro	Arena	Vidrio	20% Vidrio 80% arena	30% Vidrio 70% arena	40% Vidrio 60% arena
Gravedad Específica Bulk (gr/cm^3)	2.62	2.46	2.58	2.57	2.56
Gravedad Específica Bulk SSS (gr/cm^3)	2.56	2.47	2.52	2.53	2.52
Gravedad Específica Aparente (gr/cm^3)	2.52	2.47	2.49	2.50	2.50
Absorción (%)	1.50	0.00	1.40	1.10	1.00

Fuente. Autores.

Imagen 12. Proceso de obtención de gravedad específica y absorción del agregado fino convencional y no convencional.



Fuente. Autores.

Se presenta la tabla 15, según la tabla 500-2 del capítulo 5 de las Especificaciones Generales De Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías, INVIA, con los resultados obtenidos y la observación pertinente a cada uno de estos.

Tabla 15. Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización del agregado fino.

agregado fino:

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV - 13	REQUISITO	RESULTADO		OBSERVACIÓN
			ARENA	VIDRIO	
DURABILIDAD					
Perdidas en el ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	E-220				
Sulfato de sodio		10	-	-	-
Sulfato de magnesio		15	1.74	-	CUMPLE
LIMPIEZA					
Terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	E-211	3.0	0.8	-	CUMPLE
Partículas livianas, máximo (%)	E-221	0.5	-	-	-
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	60	64	-	CUMPLE
Material que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200), máximo (%)	E-214	3	2.8	-	CUMPLE
Índice de plasticidad	E-126 y E-135	NP	NP	-	CUMPLE
CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA					
Color oscuro más permisible	E-212	Igual a muestra patrón	-	-	-
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS					
Contenido de sulfatos, expresado como SO ₄ máximo (%)	E-233	1.2	-	-	-
ABSORCIÓN					
Absorción de agua máximo	E-222	4.0	1.5	0.0	CUMPLE

Fuente. Autores.

3.3 CEMENTO

Para la caracterización del cemento se utilizó la ficha técnica suministrada por Argos, en la cual se presentan los valores obtenidos en la realización de ensayos para el cemento tipo UG, el cual se usó en el desarrollo de la investigación. La tabla 16 muestra un resumen de la caracterización realizada basada en 3 ensayos, los cuales se referencian con esta denotación (#), a su vez, relaciona el ensayo con el resultado de la siguiente manera:

- Para (1), se indican los resultados obtenidos del ensayo con aguja de Vicat.
- Para (2), se indican los resultados obtenidos del ensayo en barras de mortero a 14 días.
- Para (3), se indican los resultados obtenidos del ensayo a compresión sobre cubos de concreto.

Tabla 16. Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización del agregado fino.

Parámetros Químicos	Especificaciones Argos	NTC 321	ASTM C-1157
Óxido de magnesio, MgO, máximo (%)	6	7	-
Trióxido de azufre, SO ₃ , máximo (%)	3.5	3.5	-
Parámetros Físicos	Especificaciones Argos	NTC 121	ASTM C-1157
Fraguado inicial (1), mínimo (minutos)	45	45	45
Fraguado final (1), máximo (minutos)	420	480	420
Expansión autoclave, máximo (%)	0.8	0.8	0.8
Expansión en agua (2), máximo (%)	0.02	-	0.02
Resistencia a 3 días, mínimo (Mpa)	9	8	13
Resistencia a 7 días, mínimo (Mpa)	16	15	20
Resistencia a 28 días, mínimo (Mpa)	26	24	28
Blaine, mínimo (cm ² /gr)	2800	2800	-

Fuente: Autores. Adaptado de: ficha técnica y especificaciones cemento gris de uso general, Argos.

4. OBTENCIÓN DE MATERIALES NO CONVENCIONALES

El presente capítulo abarca las técnicas, métodos y procedimientos realizados durante la investigación, para realizar los cilindros y vigas que van a ser fallados con el fin de determinar el comportamiento del concreto hidráulico adicionado con EAFS y vidrio molido reciclado, VMR.

4.1 PROCESO PARA OBTENER LA ARENA DE VIDRIO

El vidrio se llevará al tamaño de la arena, para hacer el reemplazo en peso por arena en 10%, 20%, 30% y 40%. Para obtener la arena de vidrio se hizo necesario aplicar el siguiente procedimiento:

4.1.1 Recolección del vidrio. El vidrio reciclado se obtuvo de las chatarrerías donde hacen una recolección de las botellas de diferentes bebidas, generalmente se encuentran botellas de bebidas alcohólicas (vino, aguardiente, cerveza y whisky), bebidas no alcohólicas (gaseosas y jugos), entre otras.

Imagen 13. Recolección del vidrio transparente de las chatarrerías.



Fuente. Autores.

4.1.2 Limpiado de etiquetas y plástico de las botellas. Limpieza inicial. Luego de la recolección de las botellas se procede a ponerlas en remojo durante 24 horas para, de esta manera, facilitar la remoción de las etiquetas. Con ayuda de cepillos esbeltos se lavan las botellas por dentro en una solución con detergente, se enjuagan y se ponen a secar. Este se considera el primer proceso de limpieza y desinfección de las botellas, eliminando rastro de comida o suciedad en cada botella.

En la imagen 14 se puede observar el procedimiento mencionado.

Imagen 14. Quitado de etiquetas y plástico de las botellas. Limpieza inicial.



Fuente. Autores.

4.1.3 Esterilización de las botellas. Segunda limpieza (profunda). Un segundo momento en la limpieza de las botellas, se presenta, cuando se emplea una solución lejía al punto 0.05% de cloro por cada galón de agua. Se enjuagan y se ponen a secar para seguir con el proceso, en la imagen 15.

Imagen 15. Esterilización de las botellas. Limpieza profunda.



Fuente. Autores.

4.1.4 Rotura de botellas con martillo. Con el objetivo de reducir el tamaño de las botellas para la molienda, se procede a romper las botellas con ayuda de un martillo. Para este caso se usaron martillos de proctor modificado y de compactación de briquetas de asfalto, teniendo precauciones de seguridad como guantes, botas punta de acero, tapabocas y gafas de seguridad. Ver imagen 16.

Imagen 16. Rotura de las botellas con martillo de compactación de briquetas de asfalto.



Fuente. Autores.

4.1.5 Molienda del vidrio en la máquina de los ángeles. Una vez hecha la rotura inicial del vidrio se procede a la molienda del mismo. Para esto se lleva el vidrio a la máquina de los ángeles (aproximadamente 8 kg cada vez), se insertan las 12 esferas metálicas y se deja entre 15 a 20 minutos dependiendo la finura necesitada: entre más tiempo se deje en la máquina de los ángeles más molido saldrá el vidrio, en la imagen 17 se muestra el montaje del ensayo y el vidrio luego de la molienda.

Imagen 17. Molienda del vidrio en la Máquina de los Ángeles.



Fuente. Autores.

4.1.6 Tamizado del vidrio. Considerada como la labor más dispendiosa de todo el proceso del vidrio por la dificultad de obtener cierto tamaño retenido o pasa. En este punto se trata de obtener cierta cantidad de vidrio para cada tamiz (retiene o pasa), según la granulometría de la arena. El vidrio se clasifica según el tamiz. Ver imagen 18.

Imagen 18. Tamizado del vidrio luego de molienda en máquina de los ángeles.



Fuente. Autores.

4.1.7 Vidrio al tamaño de la arena. Finalmente, se lleva el vidrio al mismo módulo de finura de la arena pesando en proporción, la cantidad adecuada de cada tamiz, de tal forma que su reemplazo sea adecuado, así, por ejemplo, en la tabla 17 se aprecia la proporción de cada tamiz para 5 kg de arena de vidrio:

Tabla 17. Proporción de cada tamiz para llevar el vidrio al tamaño de la arena en 5kg.

Tamiz		% Retenido	Cantidad arena
No.	mm		(g)
			5000 Retenido (g)
# 4	4.75	0.1	5
# 8	2.36	3	150
# 16	1.18	20	1000
# 30	0.6	34.8	1740
# 50	0.36	26.3	1315
# 100	0.15	9.8	490
pasa #100		6	300

Fuente. Autores.

El vidrio tamizado y separado se puede observar en la imagen 19.

Imagen 19. Vidrio molido, tamizado y separado para llevarlo al tamaño exacto de la arena.



Fuente. Autores.

En este punto se llevó todo el vidrio tamizado al módulo de finura de la arena, para luego hacer el reemplazo en peso según, sea el caso: 20%, 30% o 40%, por ejemplo, si en la mezcla se hacen necesarios 10 kg de arena (matriz), se tendrá la siguiente relación de arena – vidrio, en la tabla 18.

Tabla 18. Ejemplo de cantidad de vidrio según mezcla, para 3 kg.

Mezcla	Matriz gruesa		Matriz fina		Para el ejemplo 3000g	
	Escoria	Grava	Arena	Vidrio	Matriz fina	
					Arena	Vidrio
					g	
Patrón	0	100	100	0	3000	0
25E - 40V	25	75	80	20	2400	600
25E - 30V	25	75	70	30	2100	900
25E - 20V	25	75	60	40	1800	1200

Fuente. Autores.

En la imagen 20 se puede evidenciar el cambio de color de la arena al adicionar la cantidad especificada de vidrio (20%, 30% y 40% del volumen total del agregado fino), en donde la más clara contiene la mayor cantidad de vidrio hasta la más oscura que muestra la arena sin sustitución alguna.

Imagen 20. Cambio de color de la arena al agregar vidrio en sustitución parcial de su volumen (20%, 30% y 40%).



Fuente. Autores.

4.2 PROCESO PARA OBTENER LA ESCORIA AL TAMAÑO DE LA GRAVA

De manera similar a la matriz fina con el vidrio, se hace con la matriz gruesa con la escoria de horno de arco electico, EAFS, es decir, se lleva al tamaño de la grava. Para realizar esta labor se sigue el siguiente procedimiento:

4.2.1 Tamizado de la escoria. La escoria, al igual que el vidrio, debe ser tamizada para poder hacer la relación exacta en peso de tamices al tamaño de la grava. Fue necesario desechar la escoria retenida en el tamiz de 1" con el fin de garantizar el tamaño máximo nominal del agregado grueso. Ver imagen 21.

4.2.2 Escoria al tamaño de la grava. Se lleva, según el porcentaje retenido de cada tamiz, en peso, la escoria al tamaño de la grava, por ejemplo, en la tabla 35 se tienen 5 kg de escoria según el % retenido de cada tamiz.

Imagen 21. Tamizado de la escoria en cantera.



Fuente. Autores.

Tabla 19. Proporción de cada tamiz para 5kg de escoria al tamaño de la grava.

Tamiz		Escoria (g)	5000
		Retenido	
No.	mm	%	g
#8	2.36	0.6	28.75
#4	4.75	17.7	888.75
3/8"	9.53	74.1	3703.75
3/4"	19.05	7.6	378.75

Fuente. Autores.

5. DISEÑO DE MEZCLA

Para el diseño de mezclas de concreto hidráulico existen diversas metodologías, que se pueden diferenciar por su complejidad y cantidad de parámetros analizados. La evaluación de los parámetros, permite obtener un diseño adecuado, para llevar un control del comportamiento del concreto durante el proceso de fundición (fraguado y curado), que está directamente relacionado con la resistencia, trabajabilidad y durabilidad del mismo. El objetivo de los métodos de diseño, es determinar en peso o volumen las cantidades o dosificaciones necesarias para la conformación de la mezcla, en las cuales se expresarán las proporciones de agua, cemento, agregados finos y agregados gruesos, además de especificar la relación de agua/cemento, el tipo de cemento utilizado y la resistencia de diseño, lo cual se sintetizará en lo que INVIAS denomina como fórmula de trabajo, la cual será el objeto final de la presente investigación.

El presente trabajo de investigación, maneja la metodología de diseño de mezcla ACI 211.1, que consta de 9 pasos: 1) Elección del asentamiento. 2) Elección del tamaño máximo del agregado. 3) Estimación del contenido de aire. 4) Estimación del contenido de agua de mezclado. 5) Selección de la relación agua-cemento. 6) Cálculo de contenido de cemento. 7) Estimación de las proporciones de agregado. 8) Ajustes en la humedad. 9) Ajustes en la mezcla de prueba. Como actividad previa, se debe especificar las mezclas de concreto (tipo de agregados) y la resistencia de diseño.

5.1 MEZCLA DE CONCRETO

Se diseñaron 4 mezclas de concreto hidráulico con las características propias de los materiales y de las combinaciones, las cuales se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Mezclas de concreto.

Mezcla	Proporción de agregados	Observación
M1	Arena de Vidrio: 0% Escoria Granular:0%	Mezcla de concreto convencional denominada como mezcla patrón.
M2	Arena de Vidrio: 20% Escoria Granular:25%	Mezcla de concreto no convencional con variación en el contenido del material granular y fino en dichas proporciones.

Tabla 19. Continuación.

Mezcla	Proporción de agregados	Observación
M3	Arena de Vidrio: 30% Escoria Granular:25%	Mezcla de concreto no convencional con variación en el contenido del material granular y fino en dichas proporciones.
M4	Arena de Vidrio: 40% Escoria Granular:25%	Mezcla de concreto no convencional con variación en el contenido del material granular y fino en dichas proporciones.

Fuente: Autores.

5.2 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO

Se entiende que la resistencia de diseño (f'_{cr}), es el valor que se desea obtener al realizar el diseño de la mezcla, con el cual se asegura que el valor de resistencia especificada (f'_c), cumpla los requerimientos de calidad establecidos por las especificaciones de construcción, incluso, que sobrepase ese valor determinado con el fin, que cuando se realice la ejecución de la obra, la dispersión en el resultado promedio de la resistencia tenga la suficiente holgura para cumplir la resistencia requerida. El Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en ingles) en el comité ACI - 318, muestra dos escenarios posibles para la determinación del f'_{cr} , el primer escenario corresponde al valor determinado cuando hay datos disponibles que permitan determinar la desviación estándar de la muestra, escenario que no aplica a la investigación, el segundo escenario corresponde a los casos donde no se disponen de datos que permitan determinar la desviación estándar de la muestra. Se presenta la tabla 21, en donde es posible elegir la fórmula de cálculo que determina el valor de f'_{cr} con base en f'_c .

Tabla 21. Resistencia de diseño a compresión cuando no hay datos que permitan calcular la desviación estándar de la muestra.

f'_c a la compresión, MPa	f'_{cr} promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.3$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10 * f'_c + 5.0$

Fuente. Adaptado de AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, COMMITTEE 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. [Código de requerimientos de construcción para concreto estructural y comentarios].

Se elige la segunda expresión ya que el valor de $f'c$ es de 4000 psi, valor cercano a los 28 MPa y aproximadamente 286 kg/cm².

$$f'cr = 36.3 \text{ MPa}$$

El valor de $f'cr$ es aproximadamente 370 kg/cm².

Para efectos prácticos se sintetizará en un ejemplo los pasos que conforman el método ACI en el diseño de la mezcla patrón.

5.3 EJEMPLO DE DISEÑO DE MEZCLA

Serán necesarios los siguientes datos para realizar el proceso de diseño de la mezcla:

5.3.1 Agregado grueso:

- Peso unitario compactado: 1311 kg/m³.
- Densidad aparente seca: 2.29 g/cm³.
- Absorción: 4.6 %.
- Humedad Natural: 1.01%.

5.3.2 Agregado fino:

- Densidad aparente: 2.52 g/cm³.
- Absorción: 1.5%.
- Humedad Natural: 3.95%.

5.3.3 Cemento:

- Tipo de cemento: Cemento Argos UG.
- Peso específico del cemento: 3.15 g/cm³.

5.3.4 Elección del asentamiento. Para realizar la selección del asentamiento se contempló la consistencia de mezcla deseada en función del tipo de estructura para la que se hace el diseño, considerando esto, se elige el valor de 50 mm, el cual se encuentra en el rango de 35 a 50 mm, que corresponde a pavimentos en concreto (ver tabla 22).

Además, las especificaciones de construcción del INVIAS 2013, en el artículo 500 establece que el asentamiento con formaleta fija debe encontrarse en un rango entre los 25 a 50 mm, lo cual permite avanzar en el proceso de diseño al cumplir requisitos establecidos.

Tabla 22. Selección de asentamiento para diseño de mezcla.

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO (mm)	POSIBLE USO	COLOCACIÓN
Muy Seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; concretos de proyección neumática (lanzado)
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria
Semi-seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple	Colocación con máquinas operadas manualmente
Media	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas	Colocación manual
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo
Muy Húmeda	≥150	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos in-situ	Tubo-embudo Tremie

Fuente: Autores, adaptado de: SANCHEZ DE GUZMAN Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Título Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación. Tabla 11.3.

5.3.5 Elección tamaño máximo del agregado. Hay varios parámetros que condicionan la elección del tamaño máximo del agregado, lo cual permite hacer una elección del material según el uso para el que sea destinado dicho agregado, la ACI - 318, establece tres parámetros para la elección del tamaño del material especificando que el tamaño máximo nominal no debe ser mayor a:

- 1/5 de la menor separación entre los lados del encofrado,

- 1/3 de la altura de la losa,
- 3/4 del espaciamiento mínimo libre entre las barras o alambres individuales de refuerzo, paquetes de barras, tendones individuales, paquetes de tendones o ductos.

Sin embargo, la norma también especifica que dichos parámetros se pueden omitir a juicio del diseñador, el cual podrá diseñar en función de la trabajabilidad y los métodos de compactación, además, estará sujeto principalmente a disponibilidad económica eligiendo el mayor, pero también que sea compatible con las dimensiones de la estructura. Teniendo en cuenta estos aspectos y el material proveniente de la cantera se estima que el tamaño máximo nominal elegido para el proyecto será de 3/4", aproximadamente 19 mm.

5.3.6 Estimación del contenido de aire. La metodología ACI 211.1 contempla cuatro escenarios posibles para hacer la estimación del contenido de aire, estos se basan en la exposición que sufre la mezcla posterior al proceso de fraguado y curado, siendo el congelamiento y el deshielo los procesos más extremos que pueda sufrir, provocando posibles descensos en la resistencia de la mezcla a causa del aligeramiento de la masa.

El primer escenario corresponde a la *exposición nula*, la cual hace referencia al contenido de aire naturalmente atrapado que se origina durante el proceso de dosificación y mezclado, que es liberado al momento de la compactación.

El segundo escenario es la *exposición ligera*, el cual contempla la inclusión de aire con el fin de mejorar la cohesión o trabajabilidad, incluso para aumentar la resistencia en mezclas con baja cantidad de cemento.

El tercer escenario es la *exposición moderada*, esta toma en cuenta las mezclas que se encuentran en climas puedan sufrir congelamiento, pero no estarán expuestas de manera continua a condiciones de alta humedad o a corrientes de agua por largos periodos, tampoco será expuesto a agentes descongelantes.

Por último el cuarto escenario corresponde a la *exposición severa*, este asume la cantidad de aire incluido para las mezclas que soportarán condiciones de congelamiento y deshielo durante periodos de tiempo prolongados, así como a condiciones de humedad frecuentes

por corrientes de aguas y también productos químicos altamente agresivos como sales usadas para el descongelamiento ^[22].

Teniendo claros los escenarios del uso y estimación del contenido de aire, se elige el primer escenario, el cual corresponde al aire naturalmente atrapado (exposición nula) y el valor se define en función del tamaño máximo nominal del agregado como se aprecia en la tabla 23.

Tabla 23. Contenido aproximado de aire esperado en concreto sin aire incluido y con diferentes niveles de aire incluido.

Tamaño Máximo Nominal del Agregado		CONTENIDO DE AIRE EN % (POR VOLUMEN)			
		Naturalmente Atrapado	Exposición Ligera	Exposición Moderada	Exposición Severa
mm	pulg.				
9.51	3/8"	3.0	4.5	6.0	7.5
12.7	1/2"	2.5	4.0	5.5	7.0
19.0	3/4"	2.0	3.5	5.0	6.0
25.4	1"	1.5	3.0	4.5	6.0
38.1	1 1/2"	1.0	2.5	4.5	5.5
50.8	2"	0.5	2.0	4.0	5.0
76.1	3"	0.3	1.5	3.5	4.5
152.0	6"	0.2	1.0	3.0	4.0

Fuente: Autores, tomado de: SANCHEZ DE GUZMAN Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Titulo cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire incluido y niveles de aire incluido para diferentes tamaños máximos de agregado. Tabla 11.5.

5.3.7 Estimación del contenido de agua de mezclado. El agua necesaria para el mezclado del concreto tiene gran importancia debido a que cumple dos funciones primordiales en la conformación del mismo, la primera de ellas es hidratar el concreto, aspecto necesario para que la mezcla obtenga la resistencia necesaria, la segunda, es dar a la mezcla una consistencia manejable la cual permitirá hacer una colocación adecuada del material, sin embargo es necesario tener dicho aspecto con un control adecuado, ya que el exceso de agua, provoca en la mezcla una cantidad de vacíos indeseables luego de su evaporación, efecto que generará una disminución en la resistencia del concreto. Basados en dichas premisas se elige el valor deseado de agua para el mezclado del concreto, como se puede ver en la tabla 24.

²² AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, COMMITTEE 211. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. [Practica estandarizada para seleccionar las proporciones de concreto normal y pesado]. [documento en línea]. 2^{da} edición. Estados Unidos. ACI. 1991.

Tabla 24. Contenido aproximado de agua para mezclado esperado.

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)			
		9.51 (3/8")	12.7 (1/2")	19.0 (3/4")	25.4 (1")
mm	pulg.	Agua de mezclado, en kg/m ³			
0	0	223	201	186	171
25	1	231	208	194	178
50	2	236	214	199	183
75	3	241	218	203	188
100	4	244	221	207	192
125	5	247	225	210	196
150	6	251	230	214	200
175	7	256	235	218	205

Fuente: Autores. Adaptado de SANCHEZ DE GUZMAN Diego. Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, en concreto sin aire incluido. Tabla 11.6.

5.3.8 Selección de la relación agua – cemento. La relación agua-cemento determina la proporción en peso de la cantidad de material cementante con relación al agua adicionada a la mezcla, INVIAS en el artículo 500, tabla 500 – 6, establece que el máximo valor para dicha relación debe ser de 0.48 en concretos de fraguado normal, el cual es aplicable a la investigación. Para determinar el valor de la relación A/C es necesario realizar una interpolación a partir de la siguiente tabla con base en el valor de f'_{cr} , realizado en la tabla 25.

Tabla 25. Resistencia de diseño a compresión cuando no hay datos que permitan calcular la desviación estándar de la muestra.

RELACIÓN AGUA/CEMENTO POR PESO	
Resistencia de compresión a 28 días, kg/cm ² (f'_{cr})	Concreto sin inclusión de aire
420	0.41
350	0.48
280	0.57
210	0.68
140	0.82

Fuente. Autores. Adaptado de AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, COMMITTEE 211. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. [Practica estandarizada para seleccionar las proporciones de concreto normal y pesado].

Como el valor de $f'_{cr} = 370$ kg/cm², se interpola en los valores resaltados en el cuadro rojo con relaciones A/C entre 0.41 y 0.48 obteniendo una relación A/C = 0.47 para la f'_{cr} .

5.3.9 Cálculo del contenido de cemento. Al conocer la estimación del contenido de agua y la R a/c es posible determinar la cantidad de cemento necesaria para la mezcla:

Ecuación 1. Contenido de cemento

$$C = \frac{A}{R \text{ a/c}}$$

Donde:

A: agua (kg/m³)

R a/c: relación agua cemento

C: Cemento

$$C = \frac{199 \text{ kg/m}^3}{0.47} = 423 \text{ kg/m}^3$$

5.3.10 Estimación de las proporciones de agregado. En primer lugar, es necesario estipular el volumen del agregado grueso en estado seco y compactado por volumen unitario de concreto, para esto es indispensable conocer el módulo de finura (MF) del agregado fino, que en la caracterización se obtuvo un valor de 2.40.

Adicionalmente se debe conocer el tamaño máximo nominal del agregado y de esta manera, se escoge el volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto, así como en la tabla 26.

Tabla 26. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Tamaño máximo nominal del agregado		Módulo de finura de la arena			
mm	pulg	2.40	2.60	2.80	3.00
9.51	3/8"	0.5	0.48	0.46	0.44
19.0	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
25.4	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1	1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69

Fuente: Autores. Adaptado de SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto. Tabla 11.15.

El volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto para el tamaño máximo nominal y finura en la arena es de 0.66. Con este valor será posible determinar el peso seco del agregado grueso con la siguiente expresión:

Ecuación 2. Peso seco del agregado

$$Pg = 0.66 * \text{Peso unitario compactado AG}$$

$$Pg = 0.66 * \left(1311 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 865.26 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Luego se determinará el volumen absoluto dividiendo el Pg en la densidad aparente seca:

Ecuación 3. Volumen absoluto.

$$Vg = \frac{Pg}{\text{Densidad Aparente Seca}}$$

$$Vg = \frac{865.26 \text{ kg/m}^3}{2.29 \text{ g/cm}^3} = 378 \text{ l/m}^3$$

Al conocer las cantidades de agua de mezclado, cemento y agregado grueso es posible determinar la cantidad de agregado fino para 1 m³ de concreto, para lo cual se resume el procedimiento en la tabla 27.

Tabla 27. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Ingrediente	Peso Seco Kg/m ³	Peso Específico g/cm ³	Volumen absoluto l/m ³
Cemento	423	3.15	134
Agua	199	1	199
Cont. De aire	0	-	20
Agregado grueso	865	2.29	378
Agregado fino	668	2.52	269
TOTAL	2155		1000

Fuente: Autores.

5.3.11 Ajuste por humedad del agregado. Los agregados tanto gruesos como finos conservan en su matriz interna humedad, por lo cual se debe calcular el valor del peso húmedo de dichos agregados, para esto se suma el valor de la humedad natural al peso seco y así determinar el peso húmedo de los agregados:

Ecuación 4. Peso húmedo del agregado grueso

$$\text{Peso húmedo agregado grueso} = 865 \text{ kg/m}^3 * (1 + \text{Húmedad natural})$$

$$\text{Peso húmedo agregado grueso} = 865 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (1 + 0.0101) = 873.74 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ecuación 5. Peso húmedo del agregado fino

$$\text{Peso húmedo agregado fino} = 668 \text{ kg/m}^3 * (1 + \text{Humedad natural})$$

$$\text{Peso húmedo agregado fino} = 668 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (1 + 0.0395) = 694.39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Adicionalmente es necesario tener en cuenta la absorción que presenten los agregados ya que esta no hace parte del agua de mezclado y deberá excluirse para realizar el ajuste, además, será necesario tener en la humedad en los agregados para finalizar el ajuste por humedad. Para este proceso se utilizará la expresión 11.25 tomada del libro 'Tecnología del concreto y del mortero' de Diego Sánchez de Guzmán.

Ecuación 6. Absorción en los agregados

$$Aa = \pm Ps * \frac{(H - CA)}{100}$$

En donde:

Aa: Agua en exceso o defecto respecto de la condición SSS.

Ps: Peso seco del agregado.

H: Humedad del agregado.

CA: Capacidad de absorción del agregado.

El signo positivo o negativo en el inicio de la expresión se selecciona apoyado en las propiedades de humedad y absorción de cada uno de los agregados:

- Si la absorción < humedad natural, la expresión empezará con '-'.
- Si la absorción > humedad natural, la expresión empezará con '+'.

Entonces se tiene que:

$$Aa = 865 * \frac{(1.01\% - 4.6\%)}{100} - 728 * \frac{(3.95\% - 1.5\%)}{100} = -48.89 \text{ kg/m}^3$$

Se determina que la mezcla tiene agua en exceso por lo cual el ajuste de cantidad de agua debe quedar, así:

$$\text{Peso húmedo agua} = 199 - 48.89 = 150.11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Los valores de los pesos húmedos por metro cubico se resumen en la tabla 28.

Tabla 28. Peso seco y peso húmedo de agregado grueso por metro cúbico de concreto.

Ingrediente	Peso Seco Kg/m ³	Peso Húmedo Kg/m ³
Cemento	423	423
Agua	199	150.11
Cont. De aire	0	0
Agregado grueso	865	873.74
Agregado fino	668	694.39
TOTAL	2155	2141.24

Fuente: Autores.

5.3.12 Ajustes en las mezclas de prueba. Con este paso se finaliza el proceso de diseño, es necesario hacer unos ajustes adicionales al momento de realizar la mezcla y el proceso de fundición, un ajuste por asentamiento, y también, un ajuste adicional por resistencia. En caso que la mezcla no llegue a la resistencia esperada o en su defecto la mezcla sobre pase la resistencia esperada en una gran proporción, se deberán hacer los ajustes y pruebas necesarias hasta encontrar la mezcla ideal que deberá ser la más eficiente.

A partir de esto se resume en la tabla 29 la información necesaria para realizar el diseño de las 4 mezclas establecidas para la investigación, con las variaciones determinadas en la mezcla convencional y en las mezclas no convencionales con base en el proceso de caracterización de los materiales usados en la conformación y creación del concreto hidráulico.

Tabla 29. Parámetros de diseño para las 4 mezclas. Volumen por m³ de concreto.

MEZCLAS	AG		AF		CEMENTO	
M1	Peso Unitario Compactado	1.31 gr/cm³	Densidad Aparente	2.52 gr/cm³	Peso Específico	3.15 gr/cm³
	Densidad Aparente Seca	2.29 gr/cm³	Absorción	1.50%		
	Absorción	4.6%	Humedad Natural	3.95%		
	Humedad Natural	1.01%				
M2	Peso Unitario Compactado	1.55 gr/cm³	Densidad Aparente	2.49 gr/cm³	Peso Específico	3.15 gr/cm³
	Densidad Aparente Seca	2.47 gr/cm³	Absorción	1.40%		
	Absorción	3.9%	Humedad Natural	0.95%		
	Humedad Natural	0.73%				
M3	Peso Unitario Compactado	1.55 gr/cm³	Densidad Aparente	2.50 gr/cm³	Peso Específico	3.15 gr/cm³
	Densidad Aparente Seca	2.47 gr/cm³	Absorción	1.1%		
	Absorción	3.9%	Humedad Natural	0.85%		
	Humedad Natural	0.73%				
M4	Peso Unitario Compactado	1.55 gr/cm³	Densidad Aparente	2.52 gr/cm³	Peso Específico	3.15 gr/cm³
	Densidad Aparente Seca	2.47 gr/cm³	Absorción	1.0%		
	Absorción	3.9%	Humedad Natural	0.7%		
	Humedad Natural	0.73%				

Fuente: Autores.

Es importante mencionar que se llevó a cabo un muestreo inicial con una relación agua-cemento de 0.47 en todas las mezclas, pero producto de los ajustes por asentamiento y posterior verificación de la resistencia diseño, fue necesario modificar dicha relación en cada una de las mezclas propuestas para satisfacer el criterio de resistencia de diseño. Como producto de dicho diseño se obtienen las siguientes mezclas con sus respectivas proporciones para el análisis a compresión, en la tabla 30.

Tabla 30. Proporciones de trabajo para mezclas convencionales y no convencionales por m³ de concreto para análisis a compresión simple.

TIPO DE MEZCLA	Agua (kg)	Cemento (kg)	Agregado Grueso (kg)	Agregado Fino (kg)	Relación A/C
M1	271.6	602.0	504.5	854.7	0.45
Proporción	0.45	1.00	0.84	1.42	
M2	271.9	602.7	427.3	1037.0	0.45
Proporción	0.45	1.00	0.71	1.72	
M3	258.0	584.1	438.7	1026.1	0.44
Proporción	0.44	1.00	0.75	1.76	
M4	253.2	550.5	465.9	1019.5	0.46
Proporción	0.46	1.00	0.85	1.85	

Fuente: Autores.

También se definen las mezclas con sus respectivas proporciones para el análisis a flexotracción manteniendo la relación A/C igual en todas las mezclas, en la tabla 31.

Tabla 31. Proporciones de trabajo para mezclas convencionales y no convencionales por m³ de concreto para análisis por flexotracción.

TIPO DE MEZCLA	Agua (kg)	Cemento (kg)	Agregado Grueso (kg)	Agregado Fino (kg)	Relación A/C
M1	271.6	602.0	504.5	854.7	0.45
Proporción	0.45	1.00	0.84	1.42	
M2	271.9	602.7	427.3	1037.0	0.45
Proporción	0.45	1.00	0.71	1.72	
M3	262.8	584.1	438.7	1026.1	0.45
Proporción	0.45	1.00	0.75	1.76	
M4	247.7	550.5	465.9	1019.5	0.45
Proporción	0.45	1.00	0.85	1.85	

Fuente: Autores.

5.4 PROCESO DE FUNDICIÓN DE CILINDROS

El proceso de fundición de cilindros es el mismo para todas las correcciones previas al diseño definitivo, y al mismo diseño definitivo. Se desarrolla de la siguiente manera:

5.4.1 Especímenes. Producto del diseño se determina la cantidad de cada material, tanto de matriz fina, como de matriz gruesa, necesario para fundir los cilindros especificados para cada caso. Se cubican los cilindros, es decir, medir el alto, ancho y diámetro para definir qué cantidad de material es el suficiente para llenar el volumen. Se debe tener presente un porcentaje de desperdicio para que el material sea suficiente en la muestra: para este caso fue del 10%.

5.4.2 Equipo necesario. El laboratorio de suelos y pavimentos cuenta con una mezcladora de 0.5 caballos de fuerza, de motor eléctrico, con la que se hará la fundición de los cilindros. Ver imagen 22.

5.4.3 Mezclado. Antes de mezclar, se embadurna la mezcladora con mortero para que la mezcla no pierda la humedad y el cemento no se adhiera a las paredes del tambor, como lo especifica la norma de ensayo de materiales para carreteras, del instituto nacional de vías, INV –E 402 -13, numeral 6.1.2.

Imagen 22. Equipo de fundición de cilindros del laboratorio de suelos y pavimentos UPTC.



Fuente. Autores.

5.4.4 Medida del asentamiento. Aunque ya se haya verificado el asentamiento en el diseño, siempre, en cada una de las fundidas, se hace necesario llevar un control del mismo, para verificar que se esté dentro del rango permitido o controlado.

Como lo indica las normas de ensayos de materiales para carreteras, sección 400, norma INV E 404 – 13, del instituto nacional de vías, INVIAS, el equipo necesario consta de un molde de dimensiones especificadas en el numeral 4.1.2.1 de la norma mencionada, una varilla apisonadora lisa, recta y cilíndrica de 16 ± 2 mm de diámetro y por los menos 100

mm de largo y un flexómetro o regla para medir el asentamiento. Se adicionan tres capas de concreto, cada una se apisona con 25 golpes y al final se hace un enrasado para poder medir el asentamiento, luego de quitar el molde, como se aprecia en la imagen 23.

Imagen 23. Medida del asentamiento de la mezcla.



Fuente. Autores.

5.4.5 Colocación de la mezcla en el molde. El paso siguiente es poner la mezcla en el molde, generalmente llamada camisa, que es un cilindro de dimensiones especificadas en el numeral, 3.2 de la norma de ensayo de materiales para carreteras, del instituto nacional de vías, INVIAS, INV – E – 402. Esta norma recomienda ingresar el concreto en tres capas, cada una con 25 golpes de la varilla, cada una con 15 golpes con un mazo de caucho para reacomodar de la mejor manera el concreto en el molde, como se puede ver en la imagen 24.

Imagen 24. Mezcla en el molde cilíndrico.



Fuente. Autores.

5.4.6 Medida de la densidad. La medida del rendimiento del concreto se hace con la medida de la densidad, según lo indica la Norma de Ensayo para Construcción de Carreteras del INVIAS, INV – E 405 – 13: el ensayo consta de medir el peso de la camisa, el peso de la camisa del concreto fresco y estimar la densidad, con la diferencia de las masas sobre el volumen de la camisa.

En la imagen 25 se observa el peso de la camisa sin mezcla y con mezcla.

Imagen 25. Peso de cilindro solo y con mezcla (izquierda y derecha respectivamente)



Fuente. Autores.

5.4.7 Desencofrado y curado de los cilindros. El desencofrado consiste en sacar los cilindros de las camisas sin que sufran daño alguno, para posteriormente ponerlos en inmersión (curado) a los días especificados en los objetivos, para su rotura por compresión (7, 14, 28 o 56 días). La imagen 26 muestra los cilindros debajo del agua.

Imagen 26. Cilindros en inmersión. Foto bajo el agua.



Fuente. Autores.

5.4.8 Falla por compresión de los cilindros. Se sigue el procedimiento especificado en la Norma de Ensayo para Construcción de Carreteras, del INVIAS, 2013, INV – E 410 – 13, que consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados, con una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla.

La resistencia a la compresión se determina dividiendo la máxima carga aplicada durante el ensayo por la sección transversal del espécimen. En la imagen 27 se muestra la máquina del laboratorio para la falla de los cilindros.

Imagen 27. Falla por compresión de los cilindros en el laboratorio.



Fuente. Autores.

5.4.9 Fundición y falla de vigas. Se sigue el mismo procedimiento que para los cilindros, es decir, el mezclado, medida de asentamiento y colocación de la mezcla en la camisa, la cual es un molde prismático rectangular que debe cumplir con los requerimientos definidos en el numeral 4.2, norma E – 420, sección 400, de la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras, del Instituto Nacional de Vías, INVIAS 2013, como se puede ver en la imagen 28.

Imagen 28 . A la izquierda realización de las vigas y a la derecha vigas recién fundidas.



Fuente. Autores.

Las vigas son utilizadas para medir la resistencia a la flexión (también se encuentra en la literatura del INVIAS como flexotracción), siguiendo los lineamientos concertados en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras, del Instituto Nacional de Vías, INVIAS 2013, E – 414, denominada “resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre”, como se muestra en la imagen 29.

Imagen 29. Falla en los tercios medios de las vigas. Medida de rotura a la flexotracción.



Fuente. Autores.

5.5 AJUSTE POR ASENTAMIENTO

En el diseño se estipuló, tener una verificación constante del asentamiento de 50 mm, se fundieron dos cilindros para la mezcla patrón y dos para cada combinación (20%, 30% y 40% de vidrio). En síntesis, se fundieron 8 cilindros, para verificar el asentamiento. Adicionalmente, al realizar el ajuste por asentamiento fue necesario también recalcular la cantidad de cemento necesaria en la mezcla, esto con el fin de mantener constante el valor de la relación A/C para cada una de las mezclas definidas.

5.6 AJUSTE POR RESISTENCIA

Luego de la verificación y ajuste de la cantidad de agua adicional para obtener el asentamiento se procedió a fundir los cilindros de resistencia, que se fallaron a 7 y 28 días. Con esta verificación se tendría una idea general del comportamiento de la mezcla en cuanto a resistencia proyectada, para entender si era necesario hacer ajustes al diseño. En total se fundieron 6 cilindros de las mezclas no convencionales y 2 de la mezcla patrón como se muestra en la tabla 32.

Tabla 32. Total, de cilindros por mezcla para la primera verificación por resistencia.

Escoria (%) del grueso	Vidrio (%) del fino			Subtotal
	20	30	40	
25	2	2	2	6
50	2	2	2	6
75	2	2	2	6
100	2	2	2	6
Total				24

Fuente. Autores.

En la imagen 30 se observan los 24 cilindros fundidos para el ajuste por resistencia y en la imagen 31 se muestran en estado de inmersión en el laboratorio de suelos y pavimentos de la UPTC.

Imagen 30. Cilindros de la primera fundición por resistencia para todas las mezclas.



Fuente. Autores.

Imagen 31. Inmersión de los cilindros de la primera fundición por resistencia.



Fuente. Autores.

Debido a que la resistencia esperada no fue la proyectada en el alcance del trabajo, se hizo necesario hacer ajustes al diseño, comprendidos en variar la relación agua cemento.

5.7 FUNDICIÓN DE MEZCLA DEFINITIVA

En este punto se realizó un cambio importante: de los cilindros de dimensiones (15cm x 30cm) a unos más pequeños (10cm x 20cm). El INVIAS sustenta el cambio en la Norma General para Construcción de Carreteras, INV – E – 402: “ El diámetro de un espécimen cilíndrico o la dimensión mínima de una sección transversal rectangular debe ser por lo menos, 3 veces mayor que el tamaño máximo nominal del agregado grueso utilizado en la elaboración de la mezcla...”^[23].

Esta variación en la producción de los testigos de concreto se ajusta con el fin de hacer el proceso de fundición más eficiente en cuanto al consumo de materiales, lo cual permite

²³ REPUBLICA DE COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, INVIAS. Normas de ensayo de materiales para carreteras. Sección 400. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión. INV E - 402.

realizar más ensayos que den una visión más clara del comportamiento que sufren las diferentes mezclas propuestas.

La relación entre el diámetro del cilindro, que para este caso es de 10cm, y el tamaño máximo nominal del agregado (1.9 cm) debe ser por lo menos un valor de 3. Al hacer la relación se obtiene:

- Tamaño máximo nominal agregado grueso: $\frac{3}{4}$ "
- $\frac{3}{4}$ " a cm = 1.905 cm
- 10 cm / 1.905cm = 5.25

El diámetro es 5.25 veces más grande que el tamaño máximo nominal del agregado grueso, por lo tanto, es aceptable usar los cilindros de dimensiones 10cm x 20cm. Las relaciones agua cemento implementadas en este diseño para todas las mezclas se pueden apreciar en la tabla 33.

Tabla 33. Relaciones agua - cemento en la combinación 25% EAFS y 75% Grava.

Escoria (%) del grueso	Vidrio (%) del fino		
	20	30	40
25	0.45	0.44	0.46

Fuente. Autores.

El total de cilindros hechos para cada mezcla fue de 27, un total general de todas las proporciones de escoria con variación de vidrio en porcentaje fue de 108 cilindros más 9 cilindros de la muestra patrón. Los 9 cilindros para cada combinación comprenden 3 para fallar a los 7 días, 3 para los 28 días y 3 para los 56 días. Esta última edad no se encuentra dentro del alcance de la presente investigación, sino del trabajo de la directora del presente trabajo de grado. Ver tabla 34.

Tabla 34. Total, general de cilindros fundidos durante el trabajo de investigación.

Escoria (%) del grueso	Vidrio (%) del fino			Subtotal
	20	30	40	
25	9	9	9	27
50	9	9	9	27
75	9	9	9	27
100	9	9	9	27
Total				108

Fuente. Autores.

Imagen 32. Cilindros de la fundición definitiva en inmersión para todas las mezclas.



Fuente. Autores.

5.8 FUNDICIÓN DE VIGAS CON RELACIÓN A/C 0.45 CONSTANTE

Para el análisis a flexotracción, se decide llevar todas las mezclas a una misma relación agua – cemento, con el fin de verificar cual es la mezcla más eficiente en la conformación de un pavimento rígido. Adicionalmente se fundieron 3 cilindros de control de resistencia a compresión para los 28 días 4 vigas por mezcla, más 4 de la mezcla patrón. El total de vigas fundidas y cilindros de control se muestra en la tabla 35.

Tabla 35. Cilindros y vigas para cada mezcla fundidos.

Escoria (%) del grueso	Vidrio (%) del fino						Total cilindros	Total vigas
	20 (cilindros)	20 (vigas)	30 (cilindros)	30 (vigas)	40 (cilindros)	40 (vigas)		
25	1	4	1	4	1	4	3	12

Fuente. Autores.

Imagen 33. Cilindros de verificación de resistencia.



Fuente. Autores.

Imagen 34. Vigas para medida de resistencia a la flexotracción



Fuente. Autores.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los diagramas de fisura de las probetas de concreto falladas en el laboratorio, el resultado de la resistencia a la compresión de las mezclas de prueba, la interpretación de los resultados según la resistencia solicitada a los 7 y 28 días, la curva de las resistencias vs tiempos de cada una de las mezclas, la resistencia característica, la síntesis de la información correspondiente a densidades en estado fresco y endurecido, la resistencia a flexión (cuadro comparativo de las diferentes mezclas), un cuadro comparativo entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión, la comparación entre el módulo de rotura teórico y de laboratorio.

6.1 PATRÓN DE FISURA MEZCLAS DE CONCRETO FALLADAS

Los especímenes, una vez en la maquina universal, presentan un patrón de fractura cuando alcanzan la capacidad última. Estos patrones de fractura los presenta la norma técnica colombiana NTC 673 de 2010, y se presentan en la tabla 36.

Tabla 36. Esquema del patrón de fractura de los cilindros sometidos a compresión.

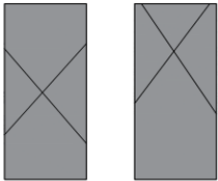
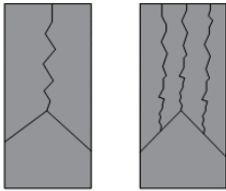

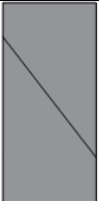
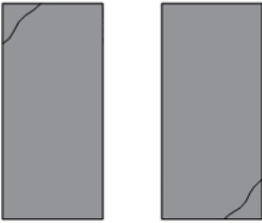

TIPO DE FALLA		
TIPO 1	Conos razonablemente bien formados en ambos extremos, fisuras a través de los cabezales de menos de 25 mm (1")	
TIPO 2	Conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, cono no bien definido en el otro extremo.	
TIPO 3	Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados.	

Tabla 36. Continuación.

TIPO DE FALLA		
TIPO 4	Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; se debe golpear suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1.	
TIPO 5	Fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos).	
TIPO 6	Similar a tipo 5 pero el extremo del cilindro es puntiagudo.	

Fuente. Autores. Basados en: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, NTC 673. Tercera Actualización, p9.

Los patrones de falla de los cilindros fueron observados y anotados, se muestran según la referencia y composición de cada cilindro en la tabla 37. La nomenclatura para cada caso es la de la tabla 36, es decir la de la Norma Técnica Colombiana NTC 673 para ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

Tabla 37. Patrón de fractura para los cilindros a compresión según la mezcla, edad y muestra.

Muestra	Edad	Mezcla			
		M1	M2	M3	M4
		Patrón de fractura de los cilindros según NTC 673			
1	7	TIPO 3	TIPO 5	TIPO 3	TIPO 3
2	7	TIPO 3	TIPO 5	TIPO 3	TIPO 3
3	7	TIPO 5	TIPO 5	TIPO 3	TIPO 3
1	28	TIPO 3	TIPO 3	TIPO 5	TIPO 5
2	28	TIPO 5	TIPO 3	TIPO 3	TIPO 3
3	28	TIPO 3	TIPO 3	TIPO 3	TIPO 5

Fuente. Autores.

En todas las mezclas se presentaron 2 tipos de fallas, las fallas por fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados (Tipo 3) y las fallas por fisuras en los lados en las partes superior e inferior (Tipo 5).

6.2 RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MEZCLAS DE PRUEBA. GRÁFICAS RESISTENCIA VS EDAD

Los resultados de la resistencia a compresión de los cilindros se muestran en los apartados siguientes, mostrando el resultado tabulado, la gráfica de resistencia vs tiempo y un análisis general de los resultados para todas las mezclas. La resistencia obtenida para cada caso fue cotejada con la tabla 38, que especifica los valores típicos de resistencia a la edad de 7, 14 y 28 días para cada marca de cemento en función de la R a/c, que se establece como R a/c alta si su valor es de 0.7, o R a/c baja si su valor es de 0.4.

Tabla 38. Resistencia del concreto según la edad y cemento tipo I (UG) colombiano. Para rangos de R a/c entre 0.7 y 0.4.

Cemento	Edad (días)		
	7	14	28
	Porcentaje de resistencia respecto a los 28 días (R a/c 0.7 - R a/c 0.4)		
Argos	60-67	80-84	100
Boyacá	58-64	79-82	100
Cairo	62-69	81-84	100
Caldas	60-66	80-83	100
Caribe	65-72	83-86	100
Diamante B/manga	65-67	82-83	100
Diamante Cúcuta	61-69	80-84	100
Diamante Tolima	61-66	80-83	100
Nare	64-66	82-83	100
Paz del Río	62-69	81-84	100
Samper Sta Rosa	66-68	83-84	100
Samper Siberia	65-68	81-84	100
Valle	59-62	79-81	100

Fuente. Adaptado de: SÁNCHEZ DE GUZMAN Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Resistencia del concreto. capítulo 6. Tabla 6.1.

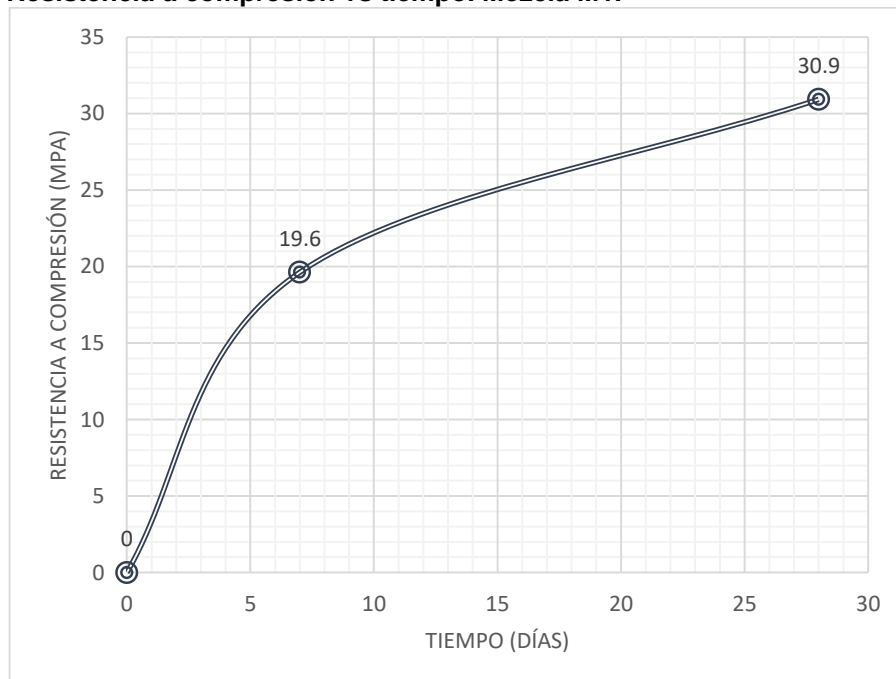
6.2.1 Mezcla M1. En la tabla 39 se muestran los resultados de resistencia a compresión de los cilindros ensayados a edades de 7 y 28 días. Además, se exponen datos adicionales como la referencia de la muestra, el volumen en cm^3 , la carga en kg y el porcentaje respecto a la resistencia especificada a los 28 días. Asimismo, en la gráfica 5 se muestra la resistencia a compresión en función del tiempo.

Tabla 39. Resultados resistencia a la compresión mezcla M1. R a/c 0.45

Asentamiento: 50 mm					f'c (Mpa)	28
Edad	Referencia Muestra	Volumen (cm^3)	Carga (Kg)	Resistencia a Compresión (Mpa)	Promedio (Mpa)	Porcentaje respecto a f'c (%)
7	P1	1586	16213	20.3	19.6	70
7	P1	1634	16213	19.7		
7	P1	1610	15194	18.9		
28	P2	1675	26717	31.6	30.9	110
28	P2	1659	23759	28.5		
28	P2	1667	272226	32.7		

Fuente. Autores.

Gráfica 5. Resistencia a compresión vs tiempo. Mezcla M1.



Fuente. Autores.

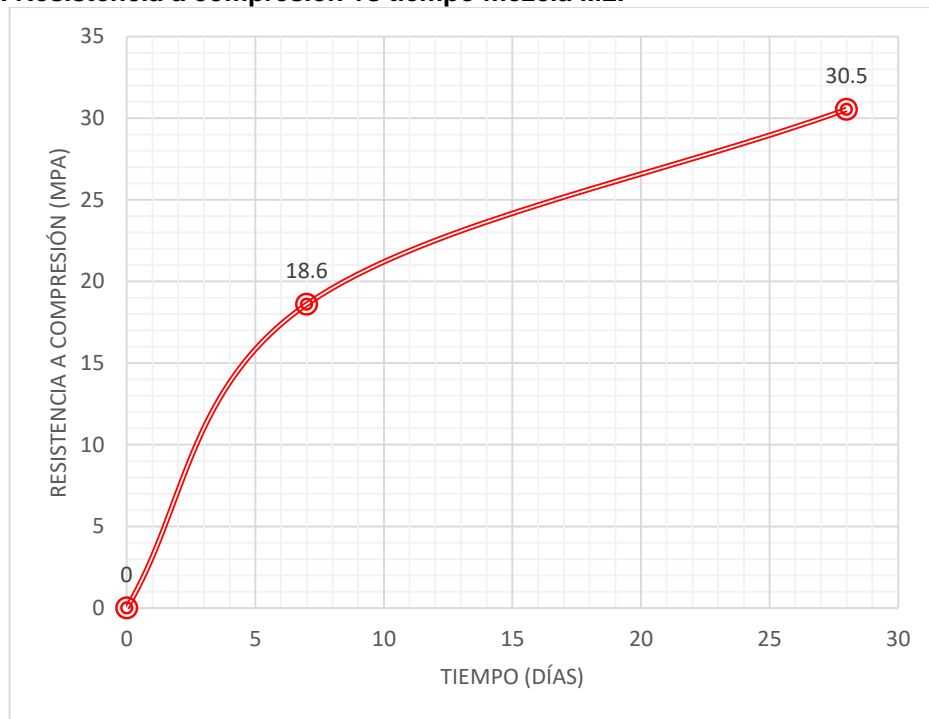
6.2.2 Mezcla M2. En la tabla 40, se exponen los resultados del promedio en Mpa, de resistencia a compresión de los cilindros y su correspondiente porcentaje respecto a la resistencia especificada a los 28 días, para la mezcla M2. Adicionalmente, la referencia de las muestras y su correspondiente volumen expresado en cm³. En la gráfica 6 se muestra el comportamiento de resistencia con respecto al tiempo.

Tabla 40. Resultados resistencia a la compresión mezcla M2. R a/c 0.45.

Asentamiento: 50 mm					f'c (Mpa)	28
Edad	Referencia Muestra	Volumen (cm ³)	Carga (Kg)	Resistencia a Compresión (Mpa)	Promedio (Mpa)	Porcentaje respecto a f'c (%)
7	2520-1	1651	15602	19.0	18.6	66
7	2520-1	1700	15602	18.5		
7	2520-1	1683	15398	18.3		
28	2520-2	1634	25901	31.7	30.5	109
28	2520-2	1758	26513	32.1		
28	2520-2	1626	22638	27.8		

Fuente. Autores.

Gráfica 6. Resistencia a compresión vs tiempo mezcla M2.



Fuente. Autores.

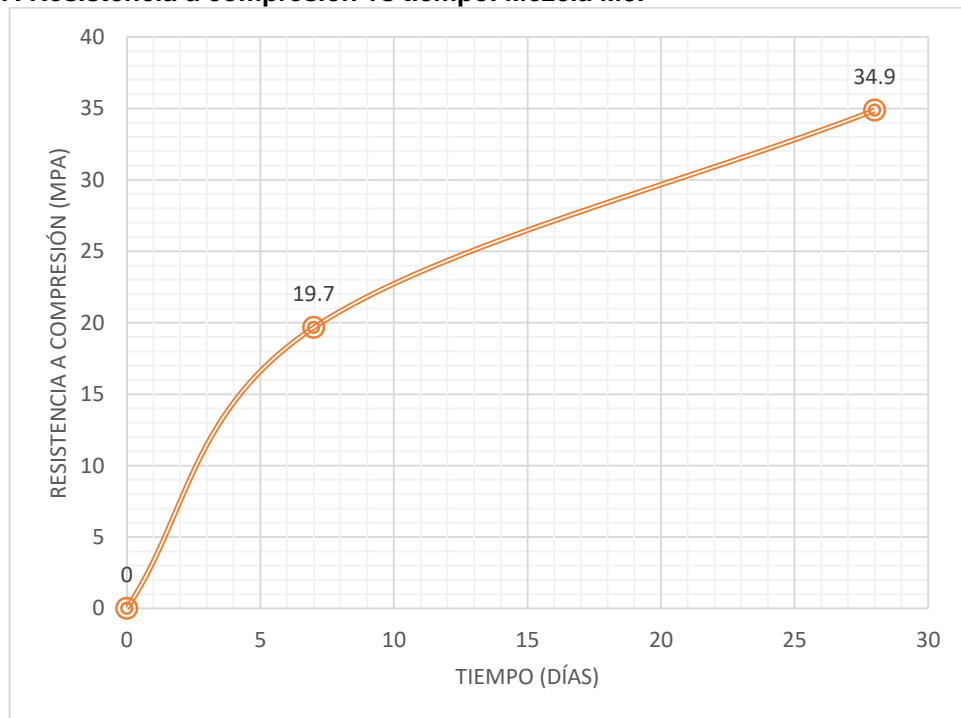
6.2.3 Mezcla M3. Los resultados promedio en Mpa y en porcentaje respecto a la resistencia de diseño especificada, para la mezcla con M3 se presentan en la tabla 41. En la gráfica 7 se observa el comportamiento de la mezcla en resistencia con respecto al tiempo.

Tabla 41. Resultados resistencia a la compresión mezcla M3. R a/c 0.44

Asentamiento: 50 mm					f'c (Mpa)	28
Edad	Referencia Muestra	Volumen (cm ³)	Carga (Kg)	Resistencia a Compresión (Mpa)	Promedio (Mpa)	Porcentaje respecto a f'c (%)
7	2530-1	1610	16825	20.9	19.7	70
7	2530-1	1683	15806	18.9		
7	2530-1	1667	16010	19.2		
28	2530-2	1626	27532	33.5	34.9	125
28	2530-2	1634	30388	36.6		
28	2530-2	1618	28348	34.5		

Fuente. Autores.

Gráfica 7. Resistencia a compresión vs tiempo. Mezcla M3.



Fuente. Autores.

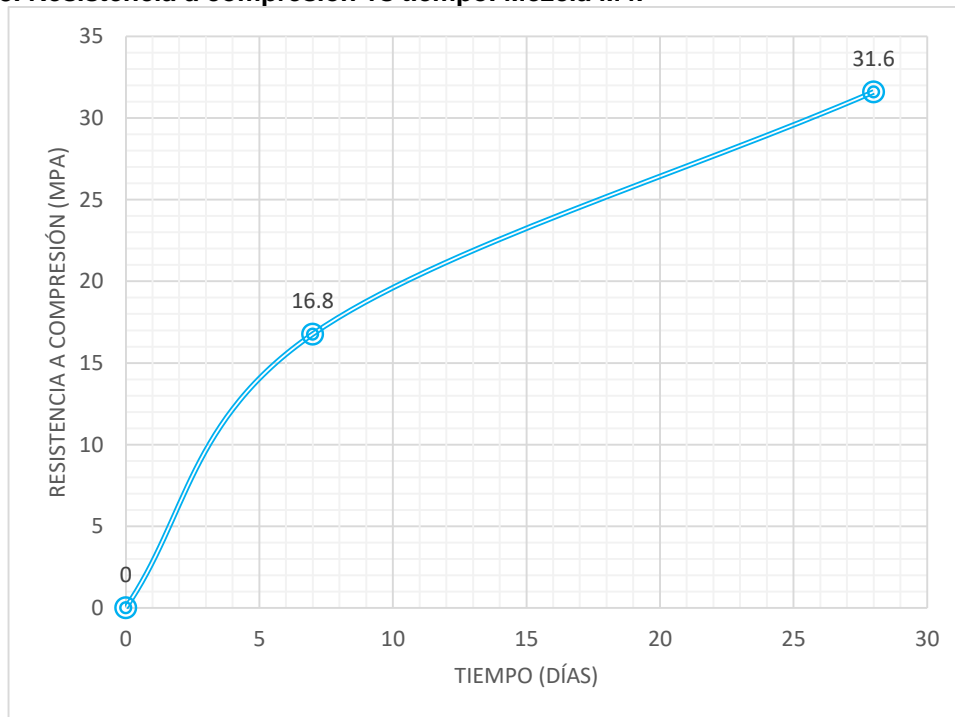
6.2.4 Mezcla M4. Los resultados de la resistencia a la compresión de los cilindros a las edades de 7 y 28 días, son presentados en la tabla 42. Su correspondiente grafica de resistencia (Mpa)vs edad (días) se muestran en la gráfica 8.

Tabla 42. Resultados resistencia a la compresión mezcla M4. R a/c 0.46

Asentamiento: 50 mm					f'c (Mpa)	28
Edad	Referencia Muestra	Volumen (cm ³)	Carga (Kg)	Resistencia a Compresión (Mpa)	Promedio (Mpa)	Porcentaje respecto a f'c (%)
7	2540-1	1610	13766	17.2	16.8	60
7	2540-1	1675	13052	15.5		
7	2540-1	1610	14276	17.6		
28	2540-2	1618	25187	31.0	31.6	113
28	2540-2	1643	25493	31.0		
28	2540-2	1602	26411	32.8		

Fuente. Autores.

Gráfica 8. Resistencia a compresión vs tiempo. Mezcla M4.

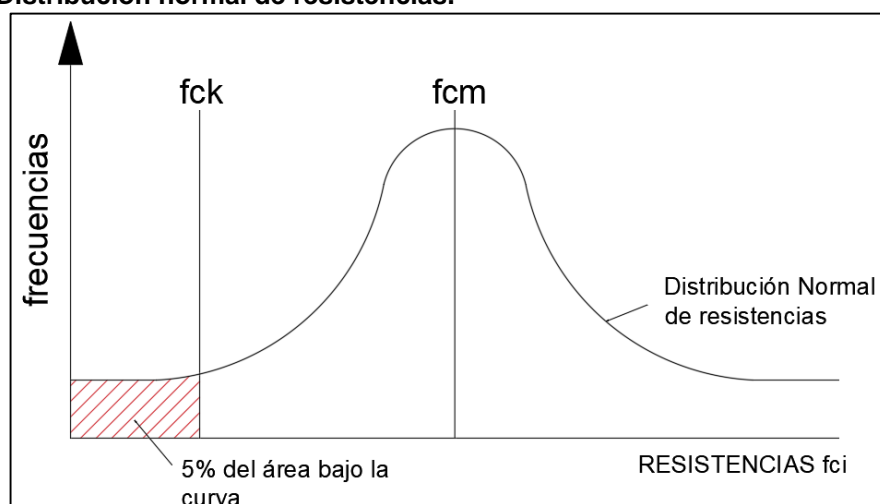


Fuente. Autores.

6.3 RESISTENCIA CARACTERÍSTICA

La resistencia característica (f_{ck}) es una medida estadística que permite observar los resultados de resistencia no simplemente con el valor promedio de los ensayos, sino también, teniendo en cuenta la dispersión de los datos haciendo uso del coeficiente de variación δ , de esta manera, es posible dar un resultado representativo de la serie de datos y con un coeficiente de seguridad. La f_{ck} indica el valor de resistencia obtenido, con un grado de confianza del 95%, lo cual significa, que hay una probabilidad de 0.95 que se obtengan resistencias individuales con un valor superior a esta resistencia.²⁴

Figura 10. Distribución normal de resistencias.



Fuente. Autor adaptado de: JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro; GARCÍA MESEGUER Álvaro y MORÁN CABRÉ, Francisco. Hormigón armado., p 85.

La tendencia en los resultados de compresión para una misma mezcla, se agrupan siguiendo una curva de distribución normal de frecuencias²⁵, siguiendo esta hipótesis JIMÉNEZ, GARCÍA Y MORAN²⁶, plantea la siguiente expresión para determinar la resistencia característica.

Ecuación 7. Resistencia característica

$$f_{ck} = f_{cm} * (1 - 1.64 * \delta)$$

En donde:

²⁴ JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro; GARCÍA MESEGUER Alvaro y MORÁN CABRÉ, Francisco. Hormigón armado. 14^{va} ed. Editorial Gustavo Gil S.A. Barcelona (Ecuador). 2001 p 85.

²⁵ RIVERA L. Gerardo A. Tecnología del concreto y del mortero. Universidad del cauca.

²⁶ Op. cit. JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro; GARCÍA MESEGUER Alvaro y MORÁN CABRÉ, Francisco, p 86.

f_{ck} : Resistencia característica.

f_{cm} : Valor promedio de resistencias a compresión.

δ : Coeficiente de Variación.

Ecuación 8. Coeficiente de variación.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{f'_{ci} - f'_{cm}}{f'_{cm}} \right)^2}$$

En donde:

δ : Coeficiente de Variación.

n : Número de ensayos realizados.

f_{ci} : Valor de resistencia por ensayo individual.

f_{cm} : Valor promedio de resistencias a compresión.

Se presentan los resultados de la resistencia característica en la tabla 43.

Tabla 43. Resistencia característica para la resistencia a la compresión.

Mezcla Cilindros	R a/c	f_{cm}	δ	f'_{ck}
M1	0.45	30.9	0.057	28.0
M2	0.45	30.5	0.064	27.4
M3	0.44	34.9	0.037	32.7
M4	0.46	31.6	0.027	30.2

Fuente. Autores.

6.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS RESISTENCIAS DE LAS MEZCLAS DE PRUEBA

A los 28 días, la resistencia encontrada, para la mezcla M1 cumple la resistencia especificada de 28 Mpa en 100%.

Para la edad de 28 días, la resistencia a la compresión de la mezcla M2, ajustada estadísticamente está en 97.8% de la resistencia esperada, es decir 0.6 Mpa por debajo.

La resistencia de la mezcla M3, supera la resistencia esperada a los 28 días, en 16.78%, con un valor equivalente de 32.7 Mpa de los 28 Mpa esperados.

El comportamiento a resistencia de la mezcla M4 cumple satisfactoriamente, pues alcanza y supera la resistencia esperada a los 28 días en 4.7 Mpa, equivalentes a 7.9% por encima del valor requerido.

6.5 DENSIDADES EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO DE LOS CILINDROS

La densidad o masa específica del concreto en estado endurecido depende de las propiedades de los materiales, sus características físicas y mecánicas, y principalmente del método o forma de compactación empleado. Para llevar un control del comportamiento de la densidad del concreto, se tomaron medidas de masa y volumen del cilindro con y sin mezcla de concreto, es decir, se pesó el cilindro vacío, con su correspondiente volumen y luego se anotó el peso del cilindro con el concreto fresco. Al quitar el peso del cilindro se obtiene la densidad en estado fresco, dividiendo la masa de la mezcla de concreto sobre el volumen del cilindro. Los valores obtenidos para las densidades en estado fresco y endurecido se muestran en la tabla 44.

Tabla 44. Densidades en estado fresco y endurecido del concreto para las mezclas.

MEZCLA	DENSIDAD EN ESTADO FRESCO (gr/cm ³)	DENSIDAD EN ESTADO ENDURECIDO (gr/cm ³)
M1	2.22	2.23
M2	2.44	2.30
M3	2.37	2.37
M4	2.20	2.35

Fuente. Autores.

6.6 MÓDULO DE ELASTICIDAD TEÓRICO

En el presente numeral, se exponen las ecuaciones de correlación de diversos autores entre el módulo de elasticidad del concreto y la resistencia a la compresión obtenida en laboratorio. Se presentan las siguientes ecuaciones:

Ecuación 9. ACI:

$$E_c = 4270 * (W)^{1.5} - (R_c)^{\frac{1}{2}}$$

En donde:

Ec: Módulo de elasticidad kg/cm².

W: Peso unitario del concreto endurecido (1.4 y 2.5 gr/cm³).

Ecuación 10. NSR - 10:

$$Ec = 4700 * \sqrt{f'c} \text{ Mpa}$$

En donde:

Ec: Módulo de elasticidad Mpa.

Resistencia a la compresión en Mpa.

Ecuación 11. Gerardo Rivera, Tecnología del Concreto y del Mortero – Unicauca. Valor medio para toda la información experimental nacional:

$$Ec = 3900 * \sqrt{f'c}$$

En donde:

Ec: Módulo de elasticidad en Mpa.

f'c: Resistencia a la compresión en Mpa.

Tabla 45. Módulo de elasticidad teórico para la mezcla M1. R a/c 0.45

f'c	W (gr/cm ³)	Ec Teórico	Autor
286 kg/cm ²	2.2	240272.8 kg/cm ²	ACI
		24870.1 Mpa	NSR -10
28.0 Mpa		20636.9 Mpa	Gerardo Rivera

Fuente. Autores.

Tabla 46. Módulo de elasticidad teórico para la mezcla M2. R a/c 0.45.

f'c	W (gr/cm ³)	Ec Teórico	Autor
279 kg/cm ²	2.3	248963.3 kg/cm ²	ACI
		24602.2 Mpa	NSR -10
27.4 Mpa		20414.6 Mpa	Gerardo Rivera

Fuente. Autores.

Tabla 47. Módulo de elasticidad teórico para la mezcla M3. R a/c 0.44.

f'c	W (gr/cm ³)	Ec Teórico	Autor
333 kg/cm ²	2.4	284488.5 kg/cm ²	ACI
		26876.5 Mpa	NSR -10
32.7 Mpa		22301.7 Mpa	Gerardo Rivera

Fuente. Autores.

Tabla 48. Módulo de elasticidad teórico para la mezcla M4. R a/c 0.46.

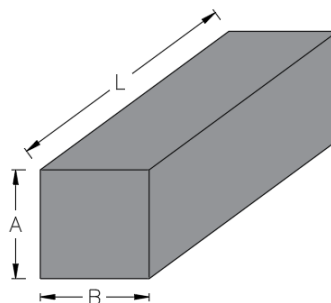
f'c	W (gr/cm ³)	Ec Teórico	Autor
308 kg/cm ²	2.4	269944.0 kg/cm ²	ACI
		25828.6 Mpa	NSR -10
30.2 Mpa		21432.3 Mpa	Gerardo Rivera

Fuente. Autores.

6.7 RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN

La resistencia a la flexotracción se realizó a todas las mezclas de concreto con el fin de verificar su viabilidad para la construcción de pavimentos rígidos. Los resultados a las edades de 7, 14 y 28 días, el correspondiente diagrama de resistencia a la flexotracción vs tiempo y la fotografía de la falla para cada mezcla, se exponen a continuación.

Figura 11. Dimensiones de las vigas para el ensayo de resistencia a flexotracción.



Fuente. Autores.

Donde:

A: altura de la viga

B: ancho de la viga

L: Largo de la viga

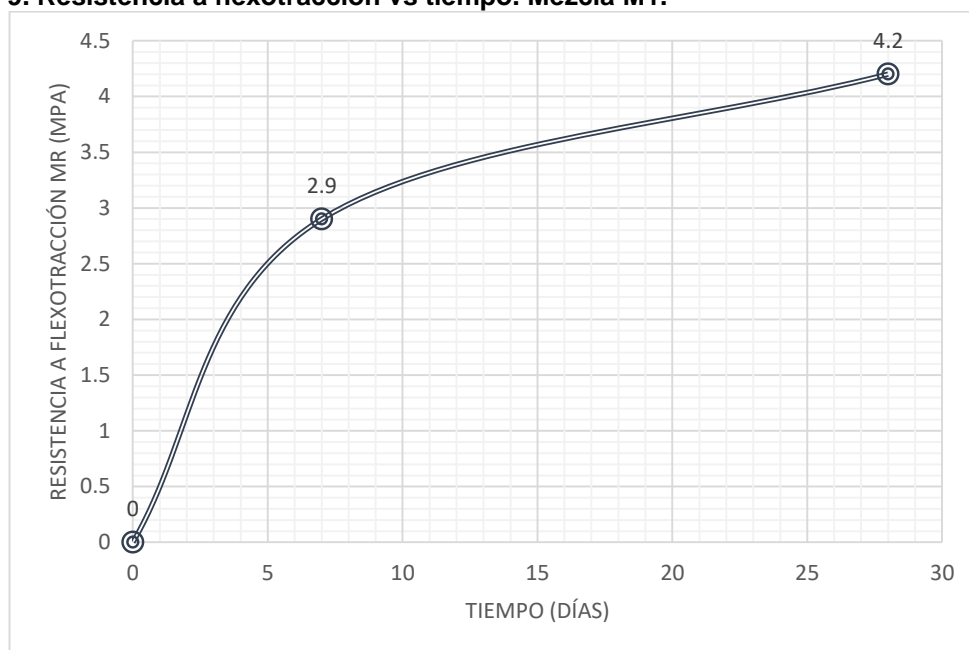
6.7.1 Mezcla M1. La resistencia a la flexotracción de la mezcla patrón se evaluó a las edades de 7 y 28 días. Las dimensiones de la viga, carga máxima, módulo de rotura (MR) promedio y en porcentaje respecto a la sollicitación del INVIAS, para un nivel de tránsito NT1 (3.8 Mpa), se muestra en la tabla 49.

Tabla 49. Resultados de resistencia a flexotracción mezcla M1. R a/c 0.45

Asentamiento: 50 mm					MR (Mpa)	
Edad	Referencia Muestra	Dimensiones Viga cm (a-b-L)	Carga Máxima (Kg)	Módulo de Rotura (Mpa)	Promedio (Mpa)	Porcentaje respecto a MR (%)
7	P1	15.05 - 15.04 - 50.5	2291	2.97	2.9	77
7	P1	15.13 - 15.03 - 50.2	2261	2.92		
28	P2	15.08 - 15.06 - 50.4	3423	4.41	4.2	110
28	P2	15.11 - 15.12 - 50.4	3062	3.91		

Fuente. Autores.

Gráfica 9. Resistencia a flexotracción vs tiempo. Mezcla M1.



Fuente. Autores.

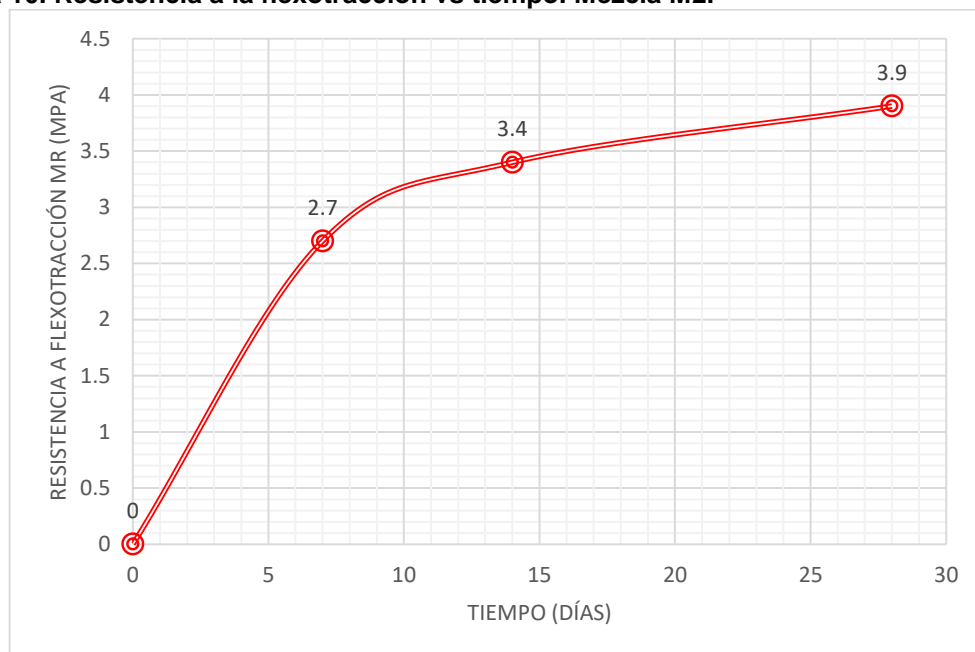
6.7.2 . Mezcla M2. Se evaluó la resistencia a la flexotracción a los 7, 14 y 28 días, en la tabla 50 se presentan los resultados para dos vigas a los 28 días (promedio), una a los 14 y una a los 7.

Tabla 50. Resultados de resistencia a flexotracción mezcla M2. R a/c 0.45

Asentamiento: 50 mm					MR (Mpa)	3.8
Edad	Referencia Muestra	Dimensiones Viga cm (a-b-L)	Carga Máxima (Kg)	Módulo de Rotura (Mpa)	Promedio (Mpa)	Porcentaje respecto a MR (%)
7	2520 - 1	15.40 - 15.17 - 50.2	2205	2.7	2.7	72
14	2520 - 1	15.16 - 15.23 - 50.2	2705	3.4	3.4	89
28	2520 - 2	15.27 - 15.13 - 50.3	3253	4.1	3.9	103
28	2520 - 2	15.18 - 15.18 - 50.4	2924	3.7		

Fuente. Autores.

Gráfica 10. Resistencia a la flexotracción vs tiempo. Mezcla M2.



Fuente. Autores.

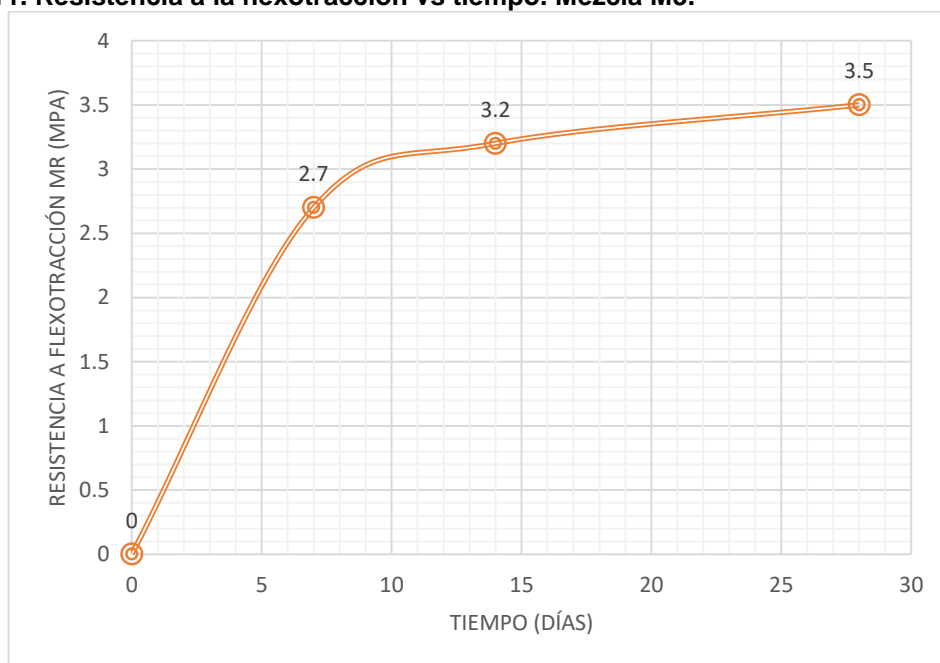
6.7.3 Mezcla M3. Al igual que la mezcla M2, se midió la resistencia a la flexotracción a 3 edades. La de 28 días un promedio de dos vigas. Ver tabla 51 y gráfica 11.

Tabla 51. Resultados de resistencia a flexotracción mezcla M3. R a/c 0.45.

Asentamiento: 50 mm					MR (Mpa)	3.8
Edad	Referencia Muestra	Dimensiones Viga cm (a-b-L)	Carga Máxima (Kg)	Módulo de Rotura (Mpa)	Promedio (Mpa)	Porcentaje respecto a MR (%)
7	2530 - 1	15.33 - 15.16 - 50.2	2192	2.7	2.7	72
14	2530 - 1	15.41 - 15.05 - 50.0	2491	3.2	3.2	83
28	2530 - 2	15.29 - 15.18 - 50.1	2790	3.5	3.5	92
28	2530 - 2	15.22 - 15.28 - 50.1	2813	3.5		

Fuente. Autores.

Gráfica 11. Resistencia a la flexotracción vs tiempo. Mezcla M3.



Fuente. Autores.

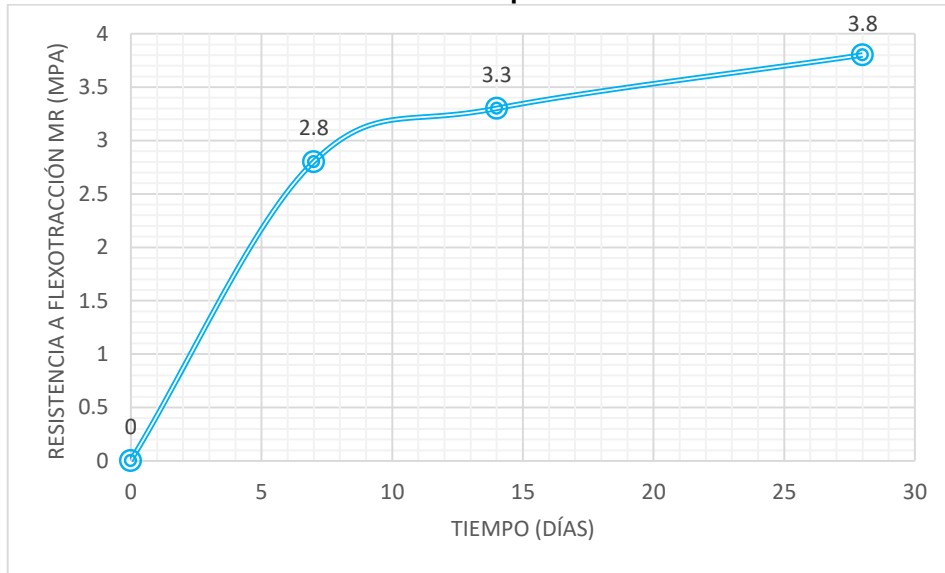
6.7.4 Mezcla M4. Se midió la resistencia a la flexotracción a 3 edades, siendo la de 28 días un promedio de dos vigas.

Tabla 52. Resultados de resistencia a flexotracción mezcla M4. R a/c 0.45.

Asentamiento: 50 mm					MR (Mpa)	3.8
Edad	Referencia Muestra	Dimensiones Viga cm (a-b-L)	Carga Máxima (Kg)	Módulo de Rotura (Mpa)	Promedio (Mpa)	Porcentaje respecto a MR (%)
7	2540 - 1	15.20 - 15.12 - 50.2	2206	2.8	2.8	74
14	2540 - 1	15.16 - 15.18 - 50.1	2651	3.3	3.3	88
28	2540 - 2	15.30 - 15.23 - 50.3	3205	4.0	3.8	100
28	2540 - 2	15.24 - 15.22 - 50.2	2830	3.6		

Fuente. Autores

Gráfica 12. Resistencia a la flexotracción vs tiempo. Mezcla M4.



Fuente. Autores.

Se pudo verificar que los testigos prismáticos rectangulares fallaron en el tercio medio de la sección, indicando un buen procedimiento de fundición, bajo las técnicas recomendadas por la norma INVIAS.

Imagen 35. Montaje del ensayo de resistencia a flexotracción.



Fuente. Autores.

Imagen 36. Falla de una viga en laboratorio en su tercio medio.



Fuente. Autores.

6.8 MR LABORATORIO VS MR TEÓRICO

Se hace un paralelo entre los datos de laboratorio de la resistencia a la flexotracción en vigas o MR y ecuaciones de diferentes autores, como se expone de la ecuación 12 a la ecuación 15.

Ecuación 12. American Concrete Institute:

$$MR = 0.392 * (f'c)^{\frac{2}{3}}$$

Donde:

$f'c$: resistencia a la compresión

Ecuación 13. Adam M. Neville:

$$MR = 0.399 * (f'c)^{\frac{2}{3}}$$

Ecuación 14. PCA:

$$MR = 0.8502 * (f'c)^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 15. KHAYAT:

$$MR = 0.23 + 0.1238 * f'c - 2.18 \times 10^{-4} * (f'c)^2$$

Al aplicar las ecuaciones para las mezclas se obtienen los valores de las tablas 53 a 56.

Tabla 53. Resultados MR teórico autores varios, para la mezcla M1. R a/c 0.45.

MR (Mpa) Laboratorio	f'ck (Mpa)	MR (Mpa) Teórico	Autor
4.2	28.0	3.6	ACI
		3.7	Adam M. Neville
		4.5	PCA
		3.5	Khayat

Fuente. Autores.

Tabla 54. Resultados MR teórico autores varios, para la mezcla M2. R a/c 0.45.

MR (Mpa) Laboratorio	f'ck (Mpa)	MR (Mpa) Teórico	Autor
3.9	27.4	3.6	ACI
		3.6	Adam M. Neville
		4.5	PCA
		3.5	Khayat

Fuente. Autores.

Tabla 55. Resultados MR teórico autores varios, para la mezcla M3. R a/c 0.45.

MR (Mpa) Laboratorio	f'ck (Mpa)	MR (Mpa) Teórico	Autor
3.5	32.7	4.0	ACI
		4.1	Adam M. Neville
		4.9	PCA
		4.0	Khayat

Fuente. Autores.

Tabla 56. Resultados MR teórico autores varios, para la mezcla M4. R a/c 0.45.

MR (Mpa) Laboratorio	f'ck (Mpa)	MR (Mpa) Teórico	Autor
3.8	30.2	3.8	ACI
		3.9	Adam M. Neville
		4.7	PCA
		3.8	Khayat

Fuente. Autores.

Al hacer un paralelo entre las resistencias a flexotracción de las correlaciones encontradas por los diferentes autores usando el valor de resistencia a compresión ($f'c$) como variable de los modelos y el módulo obtenido de laboratorio, se puede observar una similitud entre estos valores. Sin embargo, el valor presentado en la tabla 55, para la mezcla M3, se encuentra por debajo del módulo teórico definido por los autores consultados.

6.9 RELACIÓN ENTRE $F'CK$ Y MR TEÓRICO

Se realizó una relación entre los resultados de la resistencia a la compresión de los cilindros a los 28 días con el módulo de rotura teórico de las vigas a la misma edad, en la tabla 57.

Tabla 57. Relación entre resistencia característica a la compresión y módulo de rotura teórico y relación a/c variable por mezcla, a los 28 días.

MEZCLA	f'ck (Mpa)	MR Teórico (Mpa)
M1	28.0	3.8
M2	27.4	3.8
M3	32.7	4.2
M4	30.2	4.0

Fuente. Autores.

La relación entre el MR y $f'ck$ se debe hacer bajo las mismas condiciones de diseño, es decir, mezclas con la misma R a/c. Por consiguiente, se hizo necesario calcular el promedio de MR teórico para los autores mencionados. Se observa que la M1 cumple con el requisito

para resistencia a compresión, con 28 Mpa y es viable para el NT1 con un desempeño a flexotracción de 3.8 Mpa. La M2 no cumple requisito de resistencia a compresión quedando en el 98% con 27.4 Mpa, sin embargo, sería apta para implementar en losas de pavimentos rígidos para un NT1. La M3 presenta el mejor comportamiento en comparación con las demás mezclas, la resistencia a compresión más alta y NT3, es decir el más exigente. Finalmente, la M4 supera el requisito a compresión con 30.2 Mpa y es apta para NT2.

6.10 CUMPLIMIENTO DE LAS MEZCLAS PARA CADA NIVEL DE TRÁNSITO

Para las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVIAS, la resistencia mínima a la flexotracción a los 28 días, depende del nivel de tránsito. Para un nivel de tránsito 1 (NT1), se especifica una resistencia mínima de 3.8 Mpa, nivel de tránsito 2 (NT2), 4.0 Mpa y para nivel de tránsito 3 (NT3), 4.2 Mpa.

La mezcla M1 supera en 10% la resistencia a flexotracción a los 28 días, para el NT1, en 4% el NT2 y alcanza apenas el 100% para el NT3. Esto quiere decir que la mezcla tiene un comportamiento aceptable a flexotracción, cumpliendo con los requisitos de la norma vigente para su implementación en losas de pavimento rígido.

La mezcla M2, solo supera en 3% la resistencia a flexotracción para NT1. En cuanto a NT2 y NT3, se encuentra que está por debajo del requerimiento un 3% y 7% respectivamente, por lo cual su implementación en losas de pavimento rígido solo se acepta para niveles de tránsito menores a 500.000 ejes equivalentes de 80 kilonewton.

La mezcla ajustada M3, presentó un comportamiento desfavorable a flexotracción, con valores por debajo de los mínimos establecidos por INVIAS. Para NT1 el valor de resistencia no alcanza los 3.8 Mpa con el 92% de este valor, y por ende para los demás niveles de tránsito, el desempeño es menor.

Finalmente, la mezcla M4, mejoró el desempeño comparado con la mezcla M3, ya que alcanza una resistencia de 100% para NT1. Sin embargo, la resistencia fue escasa para los demás niveles de tránsito.

La tabla 58, presenta los requisitos de diseño del INVIAS, para una mezcla de concreto hidráulico, para todas las mezclas. Se expone el comportamiento de cada mezcla según la resistencia a flexotracción, contenido de cemento en masa por m³ de concreto, relación agua / material cementante y asentamiento.

Tabla 58. Requisitos de diseño para pavimento en concreto hidráulico por INVIAS.

REQUISITO			MEZCLAS			
RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN A 28 DÍAS			M1	M2	M3	M4
NT1	$N \leq 80 \text{ kN}$ 0.5	3.8 Mpa	110%	103%	92%	100%
NT2	$80 < N \leq 160 \text{ kN}$	4.0 Mpa	104%	97%	88%	95%
NT3	$N > 160 \text{ kN}$ 5.0	4.2 Mpa	100%	93%	83%	90%
CONTENIDO DE CEMENTO EN MASA POR m^3 DE CONCRETO, MÍNIMO (kg)	Concreto de fraguado normal, mínimo 300 kg		602.0	602.7	584.1	550.5
			CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
RELACIÓN AGUA / MATERIAL CEMENTANTE, MÁXIMO	Concreto de fraguado normal, 0.48		0.45	0.45	0.45	0.45
			CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
ASENTAMIENTO (mm)	Formaleta Fija (25 a 50mm)		50	50	50	50
			CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

Fuente. Autores.

CONCLUSIONES

Los apartados del presente capítulo, que hablan sobre la resistencia a compresión, están basados en el análisis de resultados desarrollado a partir de la resistencia característica.

- Se hicieron mezclas de prueba para el ajuste por resistencia (paso 9 del método ACI 211.1), con R a/c iguales (0.47), para verificar la resistencia esperada de diseño a los 28 días. Se encontró que, aunque los cilindros no cumplieron con la resistencia esperada, el comportamiento mezcla a mezcla varió, suscitando un cambio en las R a/c para cada situación específica M1 0.45, M2 0.45, M3 0.44 Y M4 0.46, con las cuales se logró alcanzar la resistencia esperada a los 28 días, con tan solo una iteración en el diseño propuesto. Al encontrar dicho comportamiento se decide utilizar una R a/c única (0.45), para desarrollar el análisis a flexotracción, encontrando que es necesario aumentar la cantidad de cemento en las mezclas no convencionales. Se demostró que llegar al valor de resistencia a compresión no garantiza que su desempeño a flexotracción sea igual de bueno.

- Se encontró el patrón de fractura tipo 3 en un 66.7% y el 33.3% restante corresponde a un patrón de fractura tipo 5 de los cilindros fallados a compresión a la edad de 28 días. Aunque el patrón tipo 5 puede indicar una mala construcción de la muestra cilíndrica, en los reportes de resistencia a compresión, se alcanzó el valor de resistencia esperado, indicando la validez de las pruebas. Se puede afirmar que el patrón de fractura no es un indicador fehaciente de la calidad de la mezcla, ya que, en los 3 especímenes de la M2, se observó el patrón tipo 3, considerado como bien definido y la resistencia esperada en esta mezcla no cumplió la sollicitación a compresión de 28 Mpa a los 28 días, caso contrario, en la mezcla M3, en la que se observó dos testigos con patrón de fractura tipo 3 y uno tipo 5, con la cual se alcanzó una resistencia de 32.7 Mpa a la edad de 28 días.

- Se determinó la resistencia característica para los cilindros a compresión, encontrando que es imperativo realizar este análisis estadístico, ya que este, tiene en cuenta la dispersión de los datos, obteniendo así, resultados representativos de la muestra y con un grado de confianza del 95%. El mejor desempeño lo obtuvo la M3 y la de peor desempeño fue la M2, que no alcanza la resistencia esperada, lo cual cambiaría si el resultado únicamente se analizara con la media aritmética.

- No se encuentra una tendencia precisa en las densidades de las mezclas en estado fresco y en estado endurecido que garantice un resultado de resistencia a la compresión. Sin embargo, aunque en las mezclas no convencionales, para la densidad en estado endurecido, hay una relación que indica que a mayor densidad mayor resistencia a la

compresión, el vidrio no es un factor diciente de dicho comportamiento, es decir no se puede determinar la influencia del vidrio en la densidad de la mezcla. Por lo tanto, el vidrio no se considera relevante en el aumento de la densidad de los cilindros, sino que este factor, podría deberse a la cantidad de material cementante de la mezcla.

- A flexotracción, la mezcla patrón demostró ser apta para la construcción de losas de pavimento rígido, para los tres niveles de tránsito (NT1, NT2 y NT3). Sin embargo, se puede afirmar que la implementación de las mezclas con EAFS y PVR en la construcción de losas de pavimento rígido, se deben hacer con relaciones a/c más bajas a las planteadas. Lo anterior se justifica porque las mezclas M2 y M4 cumplen la solicitud para el NT1, y quedan entre un 3% y 7% de satisfacer el requerimiento para el NT3.

- Al hacer la comparación entre el MR laboratorio y el MR teórico consultado, se encuentran resultados comunes con modelos definidos por autores de diferentes partes del mundo, se reafirma la pertinencia del uso de mezclas no convencionales en la construcción de losas de pavimento rígido al presentar un desempeño similar al de mezclas convencionales ya calibradas.

- Es factible implementar EAFS y PVR, a mezclas de concreto en sustitución parcial del agregado grueso y fino respectivamente, ya que, logran alcanzar las resistencias especificadas. Además, se puede mitigar el impacto ambiental, producido por los desechos de escoria de acería y vidrio, dándole uso en obras civiles; no obstante, es necesario investigar con más detalle el comportamiento de las mezclas con estos materiales a largo plazo, evaluando otras propiedades y sustituciones en porcentaje de agregado.

- Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de los agregados de las mezclas, tanto agregado convencional como no convencional, avalando su uso en la conformación de mezclas de concreto hidráulico, siguiendo la normatividad INVIAS vigente. Además, se comprueba que es viable el uso de materiales producidos a nivel regional, para el desarrollo de obras civiles.

- No se encontró indicio alguno de previas investigaciones que implementaran el vidrio en el concreto a nivel nacional, como sustituto del agregado fino. Se puede afirmar que se abre de alguna manera el campo para que futuros investigadores trabajen con este material no convencional en aplicaciones ingenieriles, con el fin de mitigar los impactos ambientales y utilizar desechos cotidianos en obras civiles.

- Se demuestra que los materiales propios de la región boyacense, tienen características conformes para su implementación en mezclas de concreto hidráulico, basados en el comportamiento observado durante el desarrollo de las pruebas, lo cual muestra el impacto positivo que puede provocar la ejecución de obras usando mezclas que adicionen desechos de la industria y que además puede generar un nuevo campo económico, el cual aún no se explota en gran medida en la región.

- Se logró controlar el asentamiento como premisa de diseño constante en todo el desarrollo de la investigación. Con lo anterior se aseguró la trabajabilidad de la mezcla durante todo el proceso de fundición de los cilindros y vigas.

RECOMENDACIONES

Es imperativo el uso obligatorio de elementos de protección personal, como botas de seguridad, gafas, tapabocas industrial, guantes y bata, en todo momento, pues, por ejemplo, para la manipulación y fabricación de la arena de vidrio, las partículas más pequeñas pueden llegar a afectar los pulmones, además en la trituración mecánica del vidrio pueden saltar fragmentos que pueden llegar a causar lesiones en áreas sensibles del cuerpo como cara y manos. Las botas de seguridad, por su parte, evitan golpes en los dedos de los pies causados por la caída de algún elemento pesado como cilindros, varillas, camisas, vigas, etc.

Como requisito de calidad se recomienda filtrar el cemento por el tamiz No. 20, lo cual elimina terrones indeseables en la mezcla de concreto y verificar que el cemento a implementar en la mezcla no haya tenido contacto con aire o humedad, pues esto afecta desfavorablemente la resistencia.

Se sugiere tener previsto un desperdicio del 10% de mezcla al momento de fundir, porque en el proceso de mezclado se pierde material que queda adherido a las paredes del equipo de mezclado.

El alcance del presente trabajo de investigación no abarca el análisis económico ni ambiental, sin embargo, se exhorta a futuros investigadores a realizar un estudio detallado de los impactos económicos y ambientales producidos por mezclas en concreto con materiales no convencionales.

Aunque las mezclas de concreto con materiales no convencionales, para este caso EAFS y vidrio molido reciclado, presentaron buen comportamiento de resistencia a la compresión, se recomienda hacer un análisis detallado del concreto en aspectos que no solo involucren las propiedades físicas y mecánicas, sino también químicas para que este tipo de mezclas puedan ser utilizadas en el futuro en obras civiles.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, COMMITTEE 211. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. [Práctica estandarizada para seleccionar las proporciones de concreto normal y pesado]. [documento en línea]. 2^{da} edición. Estados Unidos. ACI. 1991.

ARRIBAS, Idoia, et al. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. [escoria de horno de arco eléctrico y su uso en concreto hidráulico] [Base de datos en línea]. Santander (España). Publicado por Elsevier Ltda. Recibido en revisión el 16 de marzo de 2016. Aceptado el 1 de mayo de 2016. Disponible en www.sciencedirect.com.

AULESTIA ALARCON, Carlos Andrés y PAZMIÑO GARCIA José Gabriel. Determinación del módulo de rotura de hormigones de cemento hidráulico, correlación con la resistencia a la tracción diametral (método brasileño) y con la compresión simple. Trabajo de grado previo a la obtención del título de ingeniero civil. Universidad Central del Ecuador. Quito (Ecuador). 2012.

COPPOLA L. *et al.* Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. [Escoria de horno de arco eléctrico para concreto sostenible]. [Base de datos en línea]. 1^{ra} ed. Bergamo (Italia). Elsevier Ltda. 29 de junio de 2016. Disponible en línea www.sciencedirect.com.

GARCIA CALDERON, Johana Alexandra. Determinación de la correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión del concreto (caso Prevesa). Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil. Universidad pontificia Bolivariana. Bucaramanga (Colombia). 2010.

GUTIERREZ, Libia de López. El concreto y otros materiales para la construcción. 2da ed. Manizales (Colombia). Marzo de 2003. [citado el 3 de febrero de 2018]. Capítulo 1. Agregados. p 9.

JANI Yahya y HOGLAND William. Waste glass in the production of cement and concrete – A review [desperdicio de vidrio en la producción de cemento y concreto - una revisión]. [base de datos en línea]. Documento de revisión. 1^{ra} edición. Kalmar (Suecia). Publicado por Elsevier Ltd. Aceptado el 20 de marzo del 2014. Disponible en internet www.sciencedirect.com.

JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro; GARCIA MESEGUER Álvaro y MORÁN CABRÉ, Francisco. Hormigón Armado. 14^{va} ed. Editorial Gustavo Gil S.A. Barcelona (Ecuador). 2001. 844p.

LEE Hyeongi *et al.* Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. [Evaluación del desempeño del concreto incorporando polvo de vidrio reciclado como material cementante complementario]. [base de datos en línea]. República de Corea. Recibido para revisión el 10 de agosto de 2017. Aceptado el 3 de septiembre de 2017.

LIMBACHIYA, Mukesh; SEDDIK MEDDAH, Mohammed y FOTIADOU Soumela. Performance of granulated foam glass concrete. [desempeño del concreto con vidrio granulado] [base de datos en línea]. ELSERVIER Ltda. recibido en revisión el 24 de marzo de 2011. Aceptado el 5 de octubre de 2011. Disponible en: www.sciencedirect.com.

LING Tung-Chai. POON, Chi-Sun y WONG Hau-Wing. Management and recycling of waste glass in concrete products. Current situations in Hong Kong. [Manejo y reciclaje de desperdicio de vidrio en productos de concreto. Situación actual en Hong Kong] [Base de datos en línea]. 1ra ed. Edgbaston, Birmingham, (Reino Unido). Publicado por Elsevier Ltda. 29 de octubre de 2012. Disponible online en www.sciencedirect.com.

NINABANDA CANGO, Brian Ernesto. y SANTAMARÍA JEREZ, Karina Lorena. Diseño de hormigón rígido de alta resistencia utilizando escoria de acero para la aplicación en pavimento de concreto. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil. Quito (Ecuador). Universidad Central del Ecuador. 2017. 211 p.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería civil y arquitectura. Cemento. Definiciones. Tercera actualización. NTC 31. Bogotá. El instituto. 18 de junio de 2014.

OZTURK Murtar, et al. Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag. [Trabajo experimental sobre propiedades de eficacia de blindaje mecánico, electromagnético y de microondas de mortero que contiene escoria de horno de arco eléctrico] [base de datos en línea]. Iskenderun (Turquía). Publicado por Elsevier Ltda. recibido en revisión el 28 de diciembre de 2017. Aceptado el 4 de junio de 2018.

PARRA ARAQUE, Lina María. y SÁNCHEZ GARCÍA, Diana Pilar. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión

ambiental de la siderúrgica Diaco. Municipio de Tuta Boyacá. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero ambiental. Bogotá. Universidad de la Salle. 2010.118 p.

PEREZ ROJAS, Yasmin Andrea. Desempeño de adiciones en concretos con EAFS y protección del acero de refuerzo. Propuesta de trabajo doctorado en ingeniería y ciencia de materiales. Tunja (Colombia). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2016. 33 p.

PEREZ ROJAS, Yasmin Andrea. et al. Preparation of concrete mixtures with electric arc furnace slag and recycled ground [Preparación de mezclas de concreto con escoria de horno de arco eléctrico y vidrio molido reciclado]. Publicado por IOP publishing Ltda. Mayo de 2017.

RASHIDIAN DEZFOULI, Hassan; AFSHINNIA, Kaveh y RAO RANGARAJU, Prasada. Efficiency of ground glass fiber as a cementitious material, in a mitigation of alkali-silica reaction of glass aggregates in mortars and concrete. [Eficiencia de fibras de vidrio redondeadas como material cementante en la mitigación de la reacción álcali-silice de vidrio como agregado en mortero y concreto] [base de datos en línea]. 1ra ed. Clemson (Estados Unidos). Publicado por Elsevier Ltda. Recibido el 6 e julio de 2017. Publicado el 28 de noviembre de 2017.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Diccionario de la lengua española. 23va edición. Definición cemento, Diccionario de la Real Academia Española. Madrid (España). Editorial Espasa. 2014. 2432 p.

REPÚBLICA DE COLOMBIA. Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Normas de ensayo de materiales para carreteras. Sección 400. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión. INV E – 402.

REPÚBLICA DE COLOMBIA. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR – 10. Título C. Concreto estructural.

SABAPATHY, Y.K, *et al.* Experimental investigation of surface modified EOF steel slag as coarse aggregate in concrete. [Investigación experimental de la EOF de acería como agregado en concreto] [base de datos en línea]. 1^{ra} ed. Tamil Nadu (India). Publicado por: Elsevier B.V. King Saud University. 19 de julio de 2016. Disponible en internet: <www.sciencedirect.com>.

SOUZA, Marcelo T.*et al.* Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes. [Espumas de vidrio producidas a partir de botellas de vidrio y residuos de cáscara de huevo]. [base de datos en línea]. Santa Catarina (Brasil). Publicado por Elsevier B.V. recibido en revisión el 24 de mayo de 2017. Aceptado el 15 de junio de 2017.

YU Xin, et al. Performance of concrete made with steel slag and waste glass. [Desempeño del concreto hecho con escoria de acería y desperdicio de vidrio]. [Base de datos en línea]. 1ra ed. Penrith (Australia). Publicado por Elsevier Ltda. 6 de abril de 2016. Disponible en internet www.sciencedirect.com.

ANEXOS

Se anexa CD, con formatos de laboratorio de suelos y pavimentos para la caracterización de material convencional y no convencional.